

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE**



**Université Mouloud Mammeri Tizi Ouzou  
Faculté de génie de la construction  
Département de génie civil**

**MEMOIRE**

**Présenté en vue de l'obtention du diplôme de  
Master en Génie Civil  
Option : Géotechnique et environnement**

**Thème :**

**ANALYSE ET EXPLOITATION DE L'ESSAI  
PRESSIOMETRIQUE (APPLICATION A L'IDENTIFICATION  
DES PARAMETRES DU MODEL DE COMPRTMENT ET  
CALCUL DES TASSEMNTS)**

**Présenté par : M<sup>elle</sup> BACHATENE Razika**

Devant le jury d'examen

**Promotrice**

**M<sup>elle</sup> BELHASSANI**

**Président**

**Mr GUABI**

**Jury**

**M<sup>elle</sup> LOUADJE**

**Jury**

**Mm BAIDI**

## ***Remerciement***

***Je remercie en premier***

***Dieu ALLAH qui m'a donné le courage et la volonté  
pour poursuivre mes études en Master***

***Je remercie aussi ma promotrice Melle BELHASANI  
pour l'encadrement de cette thèse et  
pour la confiance qu'elle m'a accordée.***

***Je tiens à remercier les membres du jury pour avoir  
accepter de faire partie du Jury de cette thèse.***

***Je remercie également l'ensemble des enseignants du  
département de génie civil de  
L'université de Mouloud Mammeri.***

$K_0$	coefficient des terres au repos
$\square_d$	Poids volumique du sol sec
$\square'$	Poids volumique apparent immergé du sol
$\square_w$	Poids volumique de l'eau
$P_f$	la pression de fluage
$\nu$	le coefficient de poisson
$V_0$	le volume initial de la sonde au repos
$V_m$	la variation de volume
$\Delta P/\Delta V$	L'inverse de la pente de la partie linéaire de la pente
$P_L$	Pression limite
$E$	module de Young
$\beta$	coefficient d'identification des sols
$E_m$	module pressiométrique
$C_u$	la cohésion
$P_m$	pression lue sur le ma manomètre.
$r_0$	rayon de la cavité cylindrique
$p_0$	la pression des terres au repos
$K$	Module de compressibilité
$G$	cisaillement
$\varphi$	Angle de frottement
$\Psi$	Angle de dilatance
$F_i$	vecteur force
$M_g$	la masse gravitationnelle
$e$	indice des vides
$E_{oed}$	module œdométrique

## Liste des figures

<b>Figure I.1</b>	principe de l'essai pressiométrique	4
<b>Figure I.2</b>	pressiomètre Ménard	5
<b>Figure I.3</b>	contrôleur pression-volume (C.P.V)	6
<b>Figure I.4</b>	tubulure de liaison	7
<b>Figure I.5</b>	La courbe pressiométrique issue d'un pressiomètre à forage préalable	7
<b>Figure I.6</b>	Allure d'une courbe pressiométrique obtenue à partir d'es réalisé au pressiomètre autoforeur avec les différents paramètres tirés	10
<b>Figure I.7</b>	Courbe de fluage	11
<b>Figure I.8</b>	Profil pressiométrique	12
<b>Figure I.9</b>	Courbe pressiométrique corrigée	16
<b>Figure II.1</b>	État initial d'une cavité cylindrique dans un milieu infini (d'après Baguelin et al, 1978)	19
<b>Figure II .3</b>	État initial et déformé d'un élément de volume proche d'une cavité cylindrique	20
<b>Figure II .4</b>	État des contraintes sur un élément déformé	21
<b>Figure II .5</b>	Méthode de la sous tangente	23
<b>Figure III.1</b>	Séquence de calcul (d'après Itsaca 2005)	27
<b>Figure III.2</b>	Modèle de maillage utilisé en conditions axisymétriques	27
<b>Figure III.3</b>	Dimension de la grille	28
<b>Figure III.4.a</b>	Maillage du sol autour de la cavité (30 éléments)	29
<b>Figure III.4.b</b>	(Maillage du sol autour de la cavité (60 éléments)	29
<b>Figure III.5</b>	Conditions aux limites	30
<b>Figure IV.1</b>	Situation du site à l'échelle de la wilaya	31
<b>Figure VI.2</b>	les différentes couches géotechniques	33
<b>Figure VI.3</b>	Courbe brute à une profondeur de 3m (SP2)	33
<b>Figure VI.4</b>	Courbe brute à une profondeur de 11m (SP1)	34
<b>Figure IV.5</b>	La courbe d'étalonnage 1	35
<b>Figure IV.6</b>	La courbe d'étalonnages 2	35
<b>Figure IV.7</b>	la courbe brute et la courbe corrigée à 2m	37
<b>Figure IV.8</b>	la courbe brute et la courbe corrigée à 2m	38
<b>Figure IV.9</b>	la courbe brute et la courbe corrigée à 3m	39
<b>Figure IV.10</b>	la courbe brute et la courbe corrigée à 4m	40
<b>Figure IV.11</b>	la courbe brute et la courbe corrigée à 5m	41
<b>Figure IV.12</b>	la courbe brute et la courbe corrigée à 6m	42

## Liste des figures

<b>Figure IV.13</b>	la courbe brute et la courbe corrigée à 8m	43
<b>Figure IV.14</b>	la courbe brute et la courbe corrigée à 9m	44
<b>Figure IV.15</b>	la courbe brute et la courbe corrigée à 10m	45
<b>Figure IV.16</b>	la courbe brute et la courbe corrigée à 11m	46
<b>Figure IV.17</b>	la courbe brute et la courbe corrigée à 2m	47
<b>Figure IV.18</b>	la courbe brute et la courbe corrigée à 3m	48
<b>Figure IV.19</b>	la courbe brute et la courbe corrigée à 4m	49
<b>Figure IV.20</b>	la courbe brute et la courbe corrigée à 5m	50
<b>Figure IV.21</b>	la courbe brute et la courbe corrigée à 6m	51
<b>Figure IV.22</b>	la courbe brute et la courbe corrigée à 7m	52
<b>Figure IV.23</b>	la courbe brute et la courbe corrigée à 8m	53
<b>Figure IV.24</b>	la courbe brute et la courbe corrigée à 10m	54
<b>Figure IV.25</b>	la courbe brute et la courbe corrigée à 11m	55
<b>Figure IV.26</b>	la courbe brute et la courbe corrigée à 12m	56
<b>Figure IV.27</b>	la courbe brute et la courbe corrigée à 2m	57
<b>Figure IV.28</b>	la courbe brute et la courbe corrigée à 3m	58
<b>Figure IV.29</b>	la courbe brute et la courbe corrigée à 4m	59
<b>Figure IV.30</b>	la courbe brute et la courbe corrigée à 5m	60
<b>Figure IV.31</b>	la courbe brute et la courbe corrigée à 6m	61
<b>Figure IV.32</b>	la courbe brute et la courbe corrigée à 7m	62
<b>Figure IV.33</b>	la courbe brute et la courbe corrigée à 8m	63
<b>Figure IV.34</b>	la courbe brute et la courbe corrigée à 9m	64
<b>Figure IV.35</b>	la courbe brute et la courbe corrigée à 10m	65
<b>Figure IV.36</b>	la courbe brute et la courbe corrigée à 11m	66
<b>Figure IV.37</b>	la courbe brute et la courbe corrigée à 12m	67
<b>Figure IV.38</b>	module pressiométrique en fonction de la profondeur du forage 1	70
<b>Figure IV.39</b>	module pressiométrique en fonction de la profondeur du forage 2	71
<b>Figure IV.40</b>	module pressiométrique en fonction de la profondeur du forage 3	71
<b>Figure IV.41</b>	la pression limite en fonction de la profondeur du forage 1	72
<b>Figure IV.43</b>	la pression limite en fonction de la profondeur du forage 3	73
<b>Figure IV .44</b>	Courbes pressiométriques	76

## Liste des figures

<b>Figure IV.45</b>	Le déplacement au niveau du grillage	77
<b>Figure IV.46</b>	Caractéristiques géométriques du modèle 2D axisymétrique	78
<b>Figure VI.47</b>	Simulation de l'essai pressiométrique	79
<b>Figure VI.48</b>	Influence de l'angle de frottement	80
<b>Figure VI.49</b>	courbe pressiométrique expérimentale et numérique à 2m(SP2)	81
<b>Figure VI.50</b>	courbe pressiométrique expérimentale et numérique à 3m(SP2)	83
<b>Figure VI.52</b>	Courbe pressiométrique expérimentale et numérique à 10m(SP2)	84
<b>Figure V.1</b>	Schéma de découpage du sol dans le cas d'un sol hétérogène	96
<b>Figure V.2</b>	Schéma de découpage du sol dans le cas d'un sol étudié	97
<b>Figure V.3</b>	calcul des tassements d'une fondation carré pour SP2	99
<b>Figure V.4</b>	modèle utilisé pour le calcul du tassement	100
<b>Figure V.6</b>	les tassements du sol	100
<b>Figure V.7</b>	les pressions interstitielles	101
<b>Figure V.8</b>	déformation du sol	102
<b>Figure V.9</b>	le chargement appliqué par la fondation	103
<b>Figure V.10</b>	les vecteurs déplacements avec refoulement du sol	103

---

## Liste des tableaux

<b>Tableau I.1</b>	Valeur de $\beta$ suivant la nature du sol (Baguelin et al. 1978)	10
<b>Tableau I.2</b>	la longueur maximale de forage fait avant l'essai pressiométrique preforé	16
<b>Tableau I.3</b>	Classification selon le rapport $(E_m / P_l)$	17
<b>Tableau I.4</b>	Relation entre $E_m$ et le module œdométrique $E_{oed}$	17
<b>Tableau IV.1</b>	Valeur de la pression et le volume à 2m	37
<b>Tableau IV.2</b>	Valeur de la pression et le volume à 2m	36
<b>Tableau IV.3</b>	Valeur de la pression et le volume à 3m	37
<b>Tableau IV.4</b>	Valeur de la pression et le volume à 4m	38
<b>Tableau IV.5</b>	Valeur de la pression et le volume à 5m	39
<b>Tableau IV.6</b>	Valeur de la pression et le volume à 6m	40
<b>Tableau IV.7</b>	Valeur de la pression et le volume à 8m	41
<b>Tableau IV.8</b>	Valeur de la pression et le volume à 9m	42
<b>Tableau IV.9</b>	Valeur de la pression et le volume à 10m	43
<b>Tableau IV.10</b>	Valeur de la pression et le volume à 11m	45
<b>Tableau IV.11</b>	Valeur de la pression et le volume à 2m	46
<b>Tableau IV.12</b>	Valeur de la pression et le volume à 3m	47
<b>Tableau IV.13</b>	Valeur de la pression et le volume à 4m	48
<b>Tableau IV.14</b>	Valeur de la pression et le volume à 5m	49
<b>Tableau IV.15</b>	Valeur de la pression et le volume à 6m	50
<b>Tableau IV.16</b>	Valeur de la pression et le volume à 7m	51
<b>Tableau IV.17</b>	Valeur de la pression et le volume à 8m	52
<b>Tableau IV.18</b>	Valeur de la pression et le volume à 10m	53
<b>Tableau IV.19</b>	Valeur de la pression et le volume à 11m	54
<b>Tableau IV.20</b>	Valeur de la pression et le volume à 12m	54
<b>Tableau IV.21</b>	Valeur de la pression et le volume à 2m	56
<b>Tableau IV.22</b>	Valeur de la pression et le volume à 3m	57
<b>Tableau IV.23</b>	Valeur de la pression et le volume à 3m	58
<b>Tableau IV.24</b>	Valeur de la pression et le volume à 4m	59
<b>Tableau IV.25</b>	Valeur de la pression et le volume à 5m	60
<b>Tableau IV.26</b>	Valeur de la pression et le volume à 6m	61
<b>Tableau IV.27</b>	Valeur de la pression et le volume à 7m	62
<b>Tableau IV.28</b>	Valeur de la pression et le volume à 8m	63
<b>Tableau IV.29</b>	Valeur de la pression et le volume à 9m	64

## Liste des tableaux

<b>Tableau IV.29</b>	Valeur de la pression et le volume à 10m	65
<b>Tableau IV.30</b>	Valeur de la pression et le volume à 11m	66
<b>Tableau IV.31</b>	Valeur de la pression et le volume à 12m	67
<b>Tableau IV.32</b>	Le module pressiométrique E et la pression limite	68
<b>Tableau IV.33</b>	les propriétés du sol	75
<b>Tableau IV.34</b>	les paramètres tirés à partir des courbes simulées	85
<b>Tableau IV.35</b>	valeurs de Cu	87
<b>Tableau IV.36</b>	paramètres utilisés dans la simulation(SP2)	88
<b>Tableau V.1</b>	résultats de l'essai oedométrique	93
<b>Tableau V.2</b>	Valeur du coefficient de structure $\alpha$ selon le type de sol	94
<b>Tableau V.3</b>	Valeur du coefficient $\lambda$	95
<b>Tableau V.4</b>	Valeur du coefficient $\alpha$	95
<b>Tableau V.5</b>	les paramètres utilisés pour le calcul des tassements avec Flac	99

# Sommaire

Introduction générale

1

## CHAPITRE I : PRESENTATION GENERALE DE L'ESSAI PRESSIOMETRIQUE

I.1. Introduction	3
I.2. Le pressiomètre	3
I.2.1. Historique	3
I.2.2. Définition et but de l'essai	4
I.2.3. Principe de la méthode	4
I.3. Les différents types de pressiomètre	4
I.3.1. Pressiomètre MÉNARD	5
I.3.2. Pressiomètre avec forage préalable (PFP)	5
I.3.4. Courbe de fluage	9
I.3.5. Profil pressiométrique	10
I.4. Les méthodes d'interprétation	11
I.4.1. Les méthodes directes	12
I.4.2. Les méthodes analytiques	13
I.4.3 les méthodes numériques	13
I.5. Courbe pressiométrique nette	13
I.5.1. Correction de la hauteur piézométrique	14
I.5.2. Correction de l'inertie	14
I.5.3. Correction du volume	15
I.6. Forage pressiométrique	16
I.7. Relation entre $E_m$ et $P_l$	17
I.8. Classification selon le rapport $(E_m / P_l)$	18
I.9. Relation entre $E_m$ et le module œdométrique $E_{oed}$	18
I.10. Conclusion	18

## CHAPITRE II : INTERPRETATION THEORIQUE DE L'ESSAI PRESSIOMETRIQUE

II.1. Introduction	19
II .2. Théorie de l'expansion d'une cavité cylindrique	19
II.2.1. Concept de base	19
II.2.3 L'expansion en phase élastique	21

## Sommaire

II.3.1 Méthodes d'interprétation basée sur un calcul analytique	22
II.3.1.1 Méthode Ménard	22
II.3.1.2 Méthode de la sous tangente	22
II.4 Conclusion	24

### CHAPITRE III : OUTIL ET MODELISATION NUMERIQUE

III.I. Introduction	24
III.2. Les lois de comportements	24
III.3. Modèles de comportement	24
III.3.1. Modèle élastique linéaire isotrope	25
III.3.2. Modèles de comportement élastoplastique	25
III.3.3. Modèle élastique linéaire parfaitement plastique de Mohr	25
III.4. Présentation du logiciel Flac	26
III.4 .1. Introduction	26
III.5. Méthodologie de simulation avec Flac	26
III.6. Modélisation d'un essai Pressiométrique	27
III.6.1. Génération du maillage	28
III.6.2 Finesse du maillage	29
III.7. Conclusion	30

### CHAPITRE IV : ANALYSE PRESSIOMETRIQUE

IV.I. Introduction	31
IV.2. Le sondage pressiométrique	32
IV.3. La reconnaissance du sol	32
IV.4. le but de l'étude	33
IV.5. Correction des courbes	34
IV.5. 1. Les courbes d'étalonnages	35
IV.5.2. Les courbes corrigées	37
IV.6. Calculs du module pressiométrique $E_p$ et $P_l$	69
IV.6.1. Module pressiométrique $E$	71
IV.6.2. La pression limite	73
IV.6.3. La Définition du rapport $E_p/P_l$	75
IV.7. Facteur pouvant influencer l'essai pressiométrique	75

## Sommaire

IV.7.1. Influence de la profondeur	77
IV.7. 2.Influence des cellules de garde	77
IV.8 Simulation de l'essai pressiométrique	78
IV.8.1. Exemple de courbes numériques	78
IV.8.2 Conditions aux limites	80
IV.8.3. Interprétation des résultats	80
IV.8.5. Simulation des courbe pressiométrique expérimentale	83
IV.7. Détermination de la résistance au cisaillement des sols à l'aide du pressiomètre	83
IV.8. Conclusion	91

## CHAPITRE V : TASSEMENT DES SOLS

V.1. Introduction	92
V.2. Tassement de consolidation	92
V.3. Compression secondaire	92
V.4. Calcul des tassements	93
V.4.1. Introduction	93
V.4.2. Calcul des tassements pour chaque SP avec la méthode Ménard	94
V.4.2. 1. Formule générale des tassements	94
V.5. Calcul des tassements avec Flac	99
V.5. 1. Modèle utilisé dans la simulation	99
V.6. Résultats obtenus	100
V.7. Conclusion	104
Conclusion générale	105

## Introduction générale

Avant de procéder à la construction d'un ouvrage, une reconnaissance de sol en place est nécessaire, afin de garantir la stabilité de l'ouvrage et d'anticiper les éventuels problèmes lors de la conception de l'ouvrage.

Cette reconnaissance peut s'effectuer soit à partir des essais au laboratoire ou à partir des essais in situ.

Le présent travail a pour objet, de décrire l'essai préssiométrique qui permet d'appliquer un chargement latéral dans un forage, cet essai est devenu l'un des essais les plus importants en matière de reconnaissance des sols.

Son utilisation fréquente nous amène à détailler plus en avant ce type d'essai, qui est effectué au sein même du terrain. L'analyse des résultats permet d'obtenir, pour une profondeur donnée, les caractéristiques mécaniques du sol et d'effectuer les calculs des fondations.

Le préssiomètre Ménard inventé par Luis Ménard est un appareil massivement utilisé de nos jours dans les projets de fondation. Il est le seul appareil d'essai in situ qui mesure à la fois, une caractéristique de déformabilité et une caractéristique de résistance. Et d'autre part la pression limite. Une approche d'interprétation de l'essai préssiométrique permet de déterminer les paramètres intrinsèques des sols, en particulier les paramètres de cisaillement, à partir de la courbe expérimentale en utilisant des règles empiriques et avec l'évolution de la loi de comportement, une des méthodes numérique. Cette évolution a permis de faire un progrès dans la reconnaissance des sols à partir de l'essai préssiométrique.

Ce travail comporte cinq parties :

La première partie c'est une présentation générale de l'essai pressiométrique, où on a parlé du développement de cet essai et l'appareillage utilisés dans la réalisation.

La deuxième partie on a cités quelque méthode d'interprétation analytique de cet essai, on peut citer la méthode Ménard.

La troisième partie on a donné une présentation de l'outil numérique et les modèle de comportement utilisés dans la simulation.

Pour la quatrième partie nous allons faire une analyse de l'essai préssiométrique et l'importance des résultats tirés pour faire une bonne reconnaissance du sol étudié.

Le cinquième chapitre est consacré pour le calcul des tassements d'une fondation superficielle, on utilisant les paramètres tirés dans la partie précédente.



### I.1. Introduction

Un essai in situ consiste à introduire un instrument en un point précis d'un forage pour mesurer une ou plusieurs caractéristiques d'un sol ou d'une roche. Parmi ces essais on peut citer l'essai pressiométrique, qui est un essai in situ devenu classique en matière de reconnaissance de sols. Son utilisation fréquente nous amène à détailler plus en avant ce type d'essai effectué au sein même du terrain grâce à la réalisation préalable d'un forage. L'analyse des résultats permet d'obtenir, pour une profondeur donnée, les caractéristiques mécaniques du sol et d'effectuer les calculs des fondations.

Le pressiomètre Ménard inventé par Luis Ménard est un appareil massivement utilisé de nos jours. Il est le seul appareil d'essai in situ qui mesure à la fois une caractéristique de déformabilité et une caractéristique de résistance. Ces paramètres sont ensuite rentrés dans les tableaux de corrélation pour déterminer les tassements des fondations. Une autre approche d'interprétation de l'essai pressiométrique permet de déterminer les paramètres intrinsèques des sols, en particulier les paramètres de cisaillement, à partir de la courbe expérimentale en utilisant des règles empiriques, et des méthodes théoriques, et actuellement des méthodes numériques.

### I.2. Le pressiomètre

#### I.2.1 Historique

Sur le plan historique, l'idée de l'essai d'expansion latérale du sol revient à l'Allemand Kögler vers les années 1930, dans le but de mesurer un module de déformation du sol. En raison de la technologie de l'époque, l'appareil n'était pas opérationnel. De plus l'inventeur n'a pas su interpréter correctement les résultats et l'appareil a été immédiatement abandonné. C'est en 1957 qu'un jeune ingénieur français, Louis Ménard, a repris l'idée en la perfectionnant au cylindre gonflable de Kögler, il a ajouté deux cellules de garde à la cellule de mesure centrale, en évitant l'expansion de celle-ci vers le forage et rendant ainsi l'essai interprétable. L'appareil est devenu rapidement opérationnel en raison du progrès des cellules constituées de caoutchouc admettant de grandes déformations et surtout invention des tubulures de plastique semi-rigides rendant possible la réalisation d'essais en profondeur. Mais l'apport de Louis Ménard surtout consiste à définir les caractéristiques pressiométriques des sols et à mettre au point des règles d'interprétation pour le dimensionnement de la fondation. Plusieurs générations de pressiomètre ont été développées.



### I.2.2 Définition et but de l'essai

L'essai pressiométrique normal est un essai de chargement de sol en place, réalisé à l'aide d'une sonde cylindrique dilatable, laquelle est disposée au sein du terrain. L'essai permet d'obtenir une relation contrainte-déformation du sol en place.

### I.2.3 Principe de la méthode

L'essai pressiométrique consiste à dilater radialement au sein du sol une sonde cylindrique pour déterminer la relation entre la pression appliquée selon un programme de chargement imposé et le déplacement de la paroi de la sonde, la sonde est descendue dans le sol elle comprend une cellule centrale de mesure et deux cellules de garde destinées à transmettre la même pression que la cellule centrale, la mesure est répétée à différentes profondeurs. La sonde à gaine souple est directement introduite dans le sol, le C.P.V introduit un liquide dans la cellule de mesure, le volume du liquide introduit est mesuré en surface, il introduit une pression dans les cellules de garde légèrement inférieure à la pression de la cellule centrale au moyen du gaz. Dans le cas des sols difficiles on utilise des tubes lanternés.

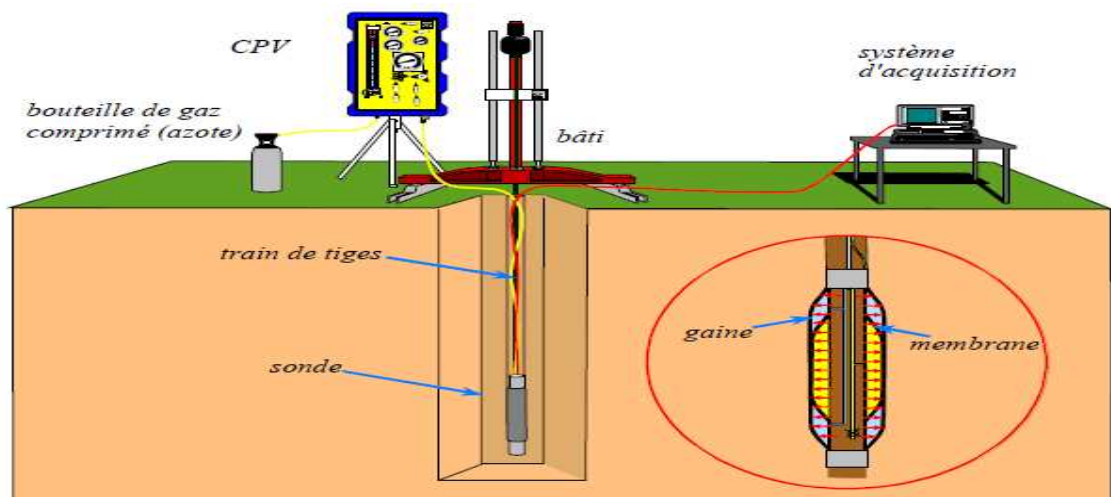


Figure I.1 : Principe de l'essai pressiométrique

## I.3. Les différents types de pressiomètre

### I.3.1 Pressiomètre MÉNARD

Il s'agit d'un essai de chargement statique du terrain en place, effectué grâce à une sonde cylindrique dilatable radialement introduite dans un forage réalisé avant.

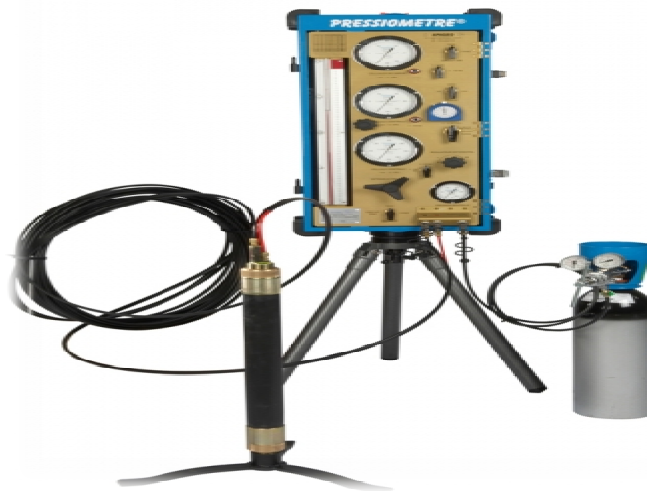


### PRESSIOMETRIQUE

L'essai permet d'obtenir une courbe de variation de volume du sol en fonction de la contrainte appliquée, et de définir une relation contrainte-déformation du sol en place.

On détermine trois paramètres :

- Le module de déformation du sol (module de Ménard)
- La pression de fluage
- La pression limite.



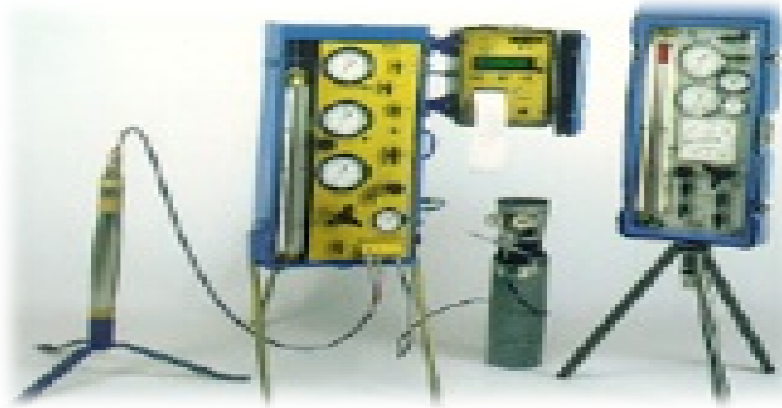
**Figure I.2 : Pressiomètre Ménard**

#### **I.3.2. Pressiomètre avec forage préalable (PFP)**

Les pressiomètres avec forage préalable sont installés dans une cavité légèrement surdimensionnée. Ces appareils peuvent être mis en œuvre dans tous les types des sols et les roches tendres. L'exemple de ce type d'appareils est le pressiomètre Ménard, composé des trois éléments suivants :



- **Un contrôleur pression-volume (C.P.V)**



**Figure I.3 : Contrôleur pression-volume (C.P.V)**

Cet appareil est placé en surface auprès du forage permet de dilater la sonde et de mesurer la relation pression déformation correspondante. Dans un CPV on distingue les organes essentiels suivants :

- Une bouteille de gaz sous pression et un mano-détendeur.
- Un indicateur de volume permettant d'apprécier au moins le  $\text{cm}^3$ .
- Une série de manomètres dont la gamme de mesure est adaptée aux pressions à mesurer.

- **Une sonde pressiométrique**

Cette sonde se présente sous la forme d'un unique cylindre en acier, dont la partie centrale de mesure est recouverte d'une membrane souple. Une gaine plus rigide recouvre ensuite l'ensemble de la sonde, isolant donc de part et d'autre la cellule centrale par deux petites cellules de garde. Lors de l'essai, l'opérateur met sous pression ces deux dernières grâce à un gaz comprimé, tandis que la cellule de mesure est remplie par le liquide du **C.P.V**.

- **Une tubulure de liaison**

Le CPV et la sonde sont reliés par deux tubes plastiques semi-rigides coaxiaux servant à conduire l'eau et le gaz sous pression.

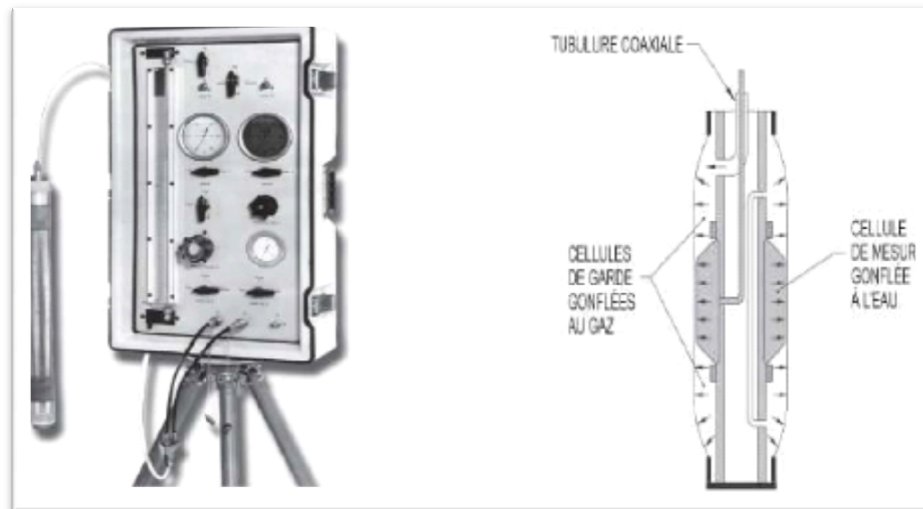
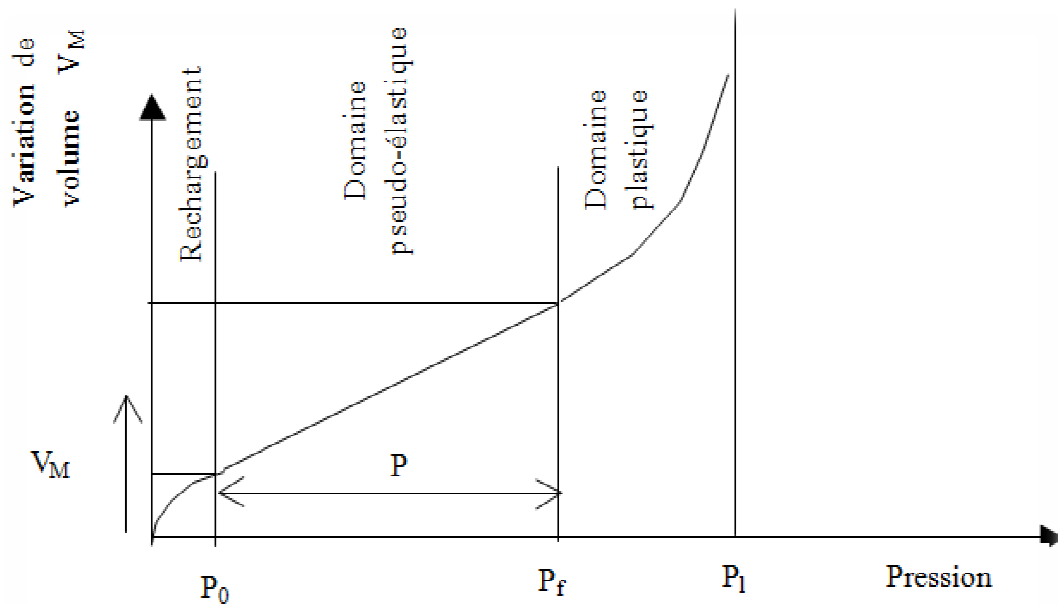


Figure I.4 : Tubulure de liaison



**Figure I.5 : La courbe pressiométrique issue d'un pressiomètre à forage préalable**  
Les résultats obtenus sont représentés par la courbe classique  $\Delta V=f(P)$  qui est composée de trois parties :

**a-Phase I**

**Décompactage du sol au tour de la sonde pressiométrique**

Elle est limitée par la pression horizontale totale des terres au repos qui est difficile à obtenir d'une manière précise.



### PRESSIOMETRIQUE

Pour tel essai  $P_0$  correspond d'après Ménard à un point situé au niveau de la première inflexion de la courbe pressiométrique. Compte tenu du remaniement inévitable du sol autour du forage et l'évolution des pressions interstitielles dues à la mise en place de la sonde, le point d'inflexion de la courbe ne correspond pas toujours à la pression horizontale des terres au repos, de façon générale, on pourra déterminer une valeur approchée de la pression  $P_0$  de la manière suivante :

Si l'essai est réalisé à une profondeur  $H_w$  par rapport au niveau du terrain naturel,

$P_0$  peut être calculée à partir de la relation suivante :

$$P_0 = K_0 [ \gamma_w \cdot H_w + \gamma' (H - H_w) ] + \gamma_w (H - H_w) \quad (I.1)$$

$K_0$  : coefficient des terres au repos.

$\gamma_d$  : Poids volumique du sol sec.

$\gamma'$  : Poids volumique apparent immergé du sol.

$\gamma_w$  : Poids volumique de l'eau.

#### b- Phase II

##### La phase pseudo-élastique du matériau ( $P_0 < p < P_f$ )

$P_f$  est la pression de fluage, elle limite le domaine "pseudo-élastique" du domaine des grandes déformations.

Cette phase est caractérisée par un module pressiométrique noté  $E_p$ .

$$E_p = 2 (1 + \nu) (V_0 + V_m) \Delta P / \Delta V \quad (I.2)$$

$\nu$  : le coefficient de poisson.

$V_0$  : le volume initial de la sonde au repos.

$V_m$  : la variation de volume.

$\Delta P / \Delta V$  : L'inverse de la pente de la partie linéaire de la courbe.



**Phase III**

**La phase des grandes déformations ( $P_f < p < P_L$ )**

Elle présente en général une asymptote verticale qui caractérise la rupture du sol. La pression limite  $P_L$ , cette pression correspond au doublement du volume initial de la sonde

**I.3.3. Pressiomètre autoforeur**

Pour diminuer les inconvénients dus au préforage, cette sonde pressiométrique est équipée d'un auto-foreur qui peut forer lui même son propre trou. L'appareil comporte également les trois parties citées précédemment (pour le pressiomètre de Ménard). Cependant, la sonde de ce pressiomètre est monocellulaire et présente les caractéristiques particulières suivantes:

La mise en place de la sonde pressiométrique se fait par autoforage grâce à un carottier mince muni d'un dispositif solidaire de la sonde qui désagrège le sol au fur et à mesure de l'enfoncement. Le sol désagrégé pénètre dans le carottier et remonte à la surface grâce à l'injection d'un fluide sous pression.

Les résultats de l'essai donnent la courbe pressiométrique représentée sur la figure (I-6). On notera que contrairement au pressiomètre de Ménard, l'allure de la courbe ne fait pas apparaître la phase de recomptage, et seules les phases pseudo-élastiques et de grandes déformations subsistent. La concavité de la courbe est monotone.

Pour une utilisation pratique de cette courbe, Baguelin et al. (1978), ont été amenés à définir plusieurs modules : un module initial tangent  $G_{p_0}$  deux modules de cisaillement sécants  $G_{p_2}$  et  $G_{p_5}$  définis entre la pression  $P_0$  et les pressions  $P_2$  et  $P_5$  ( $P_i$  est la pression correspondant à la déformation ( $V/V_0 = 2\%$ )). Le module d'Young est alors donné par l'expression.

$$E = 2 \cdot (1 + \nu) \cdot G \quad (I.3)$$

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (I.4)$$

Baguelin et al. ont également défini un coefficient d'identification des sols, noté  $\beta$  qui caractérise l'allure des courbes.

$$V/V_0 = f(P) \quad (I.5)$$



Ce coefficient est défini en fonction des pressions  $P_0$ ,  $P_5$  et  $P_{20}$  par la relation suivante :

$$\beta = \frac{P_{20}-P_5}{P_{20}-P_0} \quad (I.6)$$

Le comportement du sol au cisaillement affecte la forme de la courbe pressiométrique, le coefficient  $\beta$  dépend donc de la nature du sol. Baguelin et al. donnent la classification présentée dans Tableau I-1.

Tableau I.1 : Valeur de  $\beta$  suivant la nature du sol (Baguelin et al., 1978).

	Argiles Sensibele	Argiles très sensibles	Sables compressibles	Sables dilatant	Sablestrès Dilatant
$\beta$ (%)	<25	[25,40]	[35,50]	[45,60]	>60

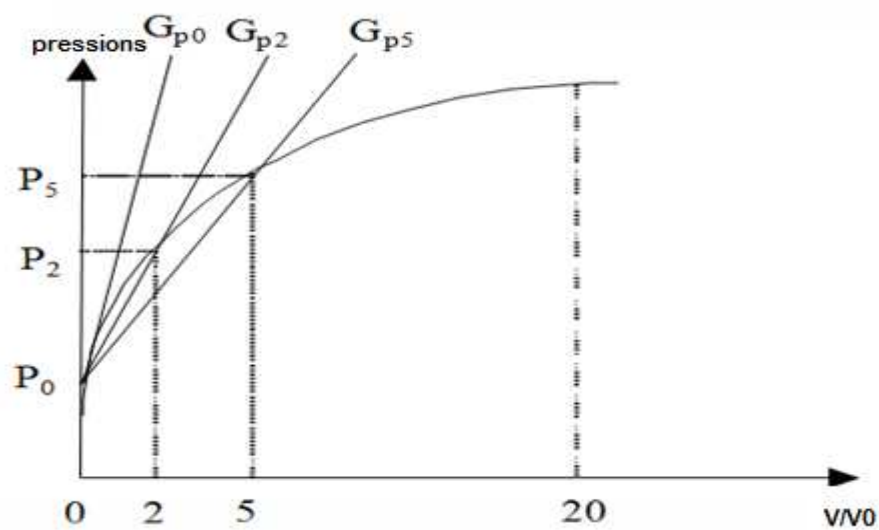


Figure I.6 : Allure d'une courbe pressiométrique obtenue à partir d'essai réalisé au pressiomètre autoforeur avec les différents paramètres tirés



### I.3.4 Courbe de fluage

Représente la variation de volume de la sonde entre trente seconde et une minute pour chaque palier de pression, traduit une vitesse de déformation en fonction de la contrainte appliquée. La pression de fluage peut également être déterminée à partir de la courbe de fluage de la façon suivante ; on reporte les différences de volume entre les lectures à 1 minute et 30 secondes pour chaque palier de pression. On trace les deux droites moyennes des deux groupes de points. L'abscisse de l'intersection des deux droites respectivement, par les points  $(\Delta v^{60}/^{30})$  appartenant à la phase pseudo élastique et la phase des grandes déformations et la pression de fluage.

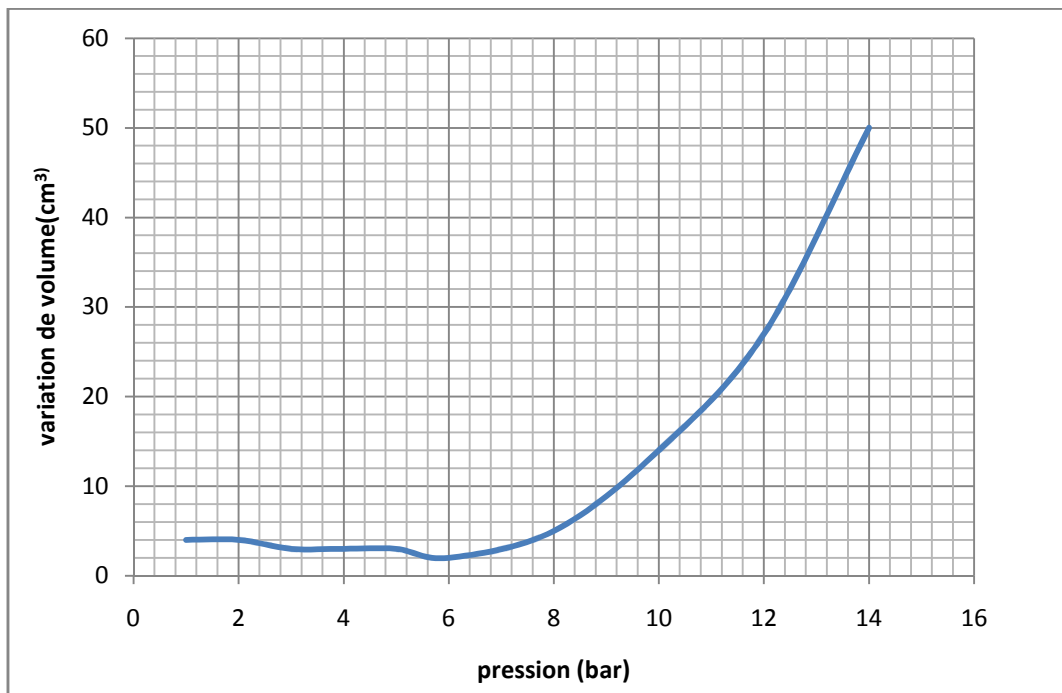


Figure I.7 : Courbe de fluage

### I.3.5. Profil pressiométrique

Les valeurs du module pressiométrique, de la pression de fluage, la pression limite obtenues au pressiomètre sont systématiquement représentées en fonction de la profondeur, en parallèle avec les résultats géologiques, les courbes d'avancement de l'outil et les courbes de



battage, le niveau de la nappe. La présentation simultanée de ces divers résultats permet de définir des profils géotechniques comme par exemple celui représenté sur la figure (I-8).

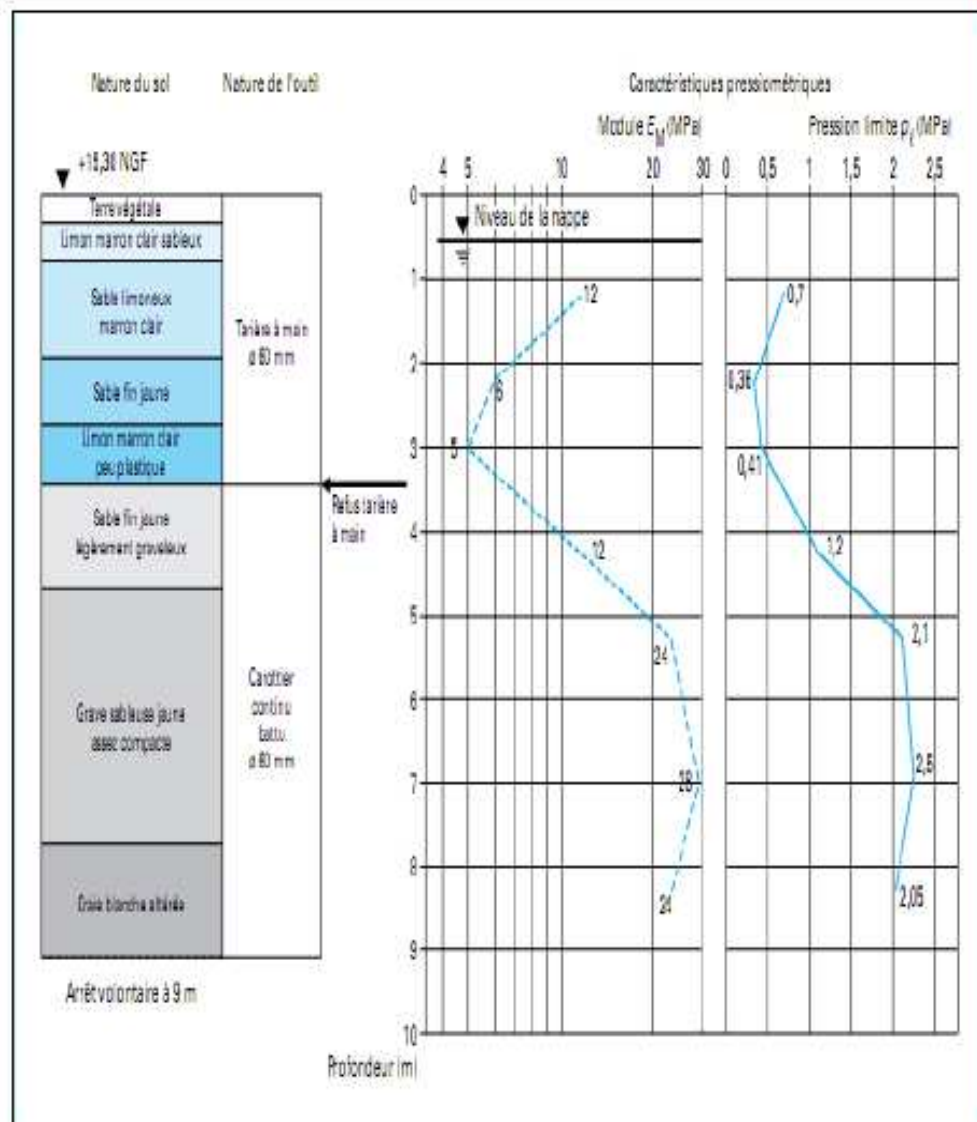


Figure I.8 : Profil pressiométrique

#### I.4. Les méthodes d'interprétation

L'essai pressiométrique permet d'avoir accès aux caractéristiques élastiques (module pressiométrique  $E_m$  et de rupture (pression limite  $P_L$ ) du sol. Cependant, de nombreuses approches ont été développées, pour exploiter de manière plus complète ce type d'essai. Dans cette partie, nous nous contenterons de citer ces différentes méthodes, sans les décrire précisément.

Les différentes méthodes d'interprétation peuvent être séparées en trois catégories : les



méthodes directes, les méthodes basées sur une étude analytique, et enfin les méthodes numériques.

#### **I.4.1. Les méthodes directes**

Elles sont encore largement utilisées, notamment dans la réglementation relative au dimensionnement des ouvrages de fondations. Plusieurs auteurs ont proposé des règles empiriques basées sur des observations du comportement de fondations. On peut citer principalement les travaux de Ménard (1957), Amar et Jézéquel (1972) et Baguelin et Jézéquel (1973). Ces méthodes permettent notamment d'évaluer la valeur de la cohésion non drainée  $C_u$  à partir de la pression limite  $P_L$ .

#### **I.4.2. Les méthodes analytiques**

Les méthodes analytiques sont principalement basées sur la solution de l'expansion d'une cavité cylindrique dans un milieu élasto-plastique. On peut différencier parmi ces méthodes celles prenant en compte une déformation sans variation de volume dans la phase plastique (*Ménard, 1957 ; Gibson et Anderson, 1961 ; Prévost et Hoeg, 1975 ; Windle et Wroth, 1977 ; Denby, 1978 ; Jefferies, 1988 ; Housby et Withers, 1988 ; Monnet, 1992 ; Ferreira et Roberston, 1994*) et celles prenant en compte une déformation avec variation de volume (*Ladany, 1963 ; Salençon, 1966 ; Hughes et al., 1977 ; Roberston et Hughes, 1986 ; Housby et al., 1986 ; Manassero, 1989*).

Avec l'apparition du pressiomètre autoforeur, plusieurs auteurs ont proposé des théories basées sur la dérivation de la courbe pressiométrique, conduisant à déterminer la courbe de cisaillement élémentaire du matériau en place (*Palmer, 1972 ; Ladany, 1972 ; Baguelin et al., 1972*).

#### **I.4.3. les méthodes numériques**

Le développement des moyens informatiques a conduit à la mise au point de codes de calcul de plus en plus élaborés. Depuis quelques années, de nombreux travaux portent sur l'identification des paramètres de modèles de comportement à partir de l'essai pressiométrique. On peut citer notamment les travaux de *Boubanga (1990)* et *Bahar (1992)* menés à l'Ecole Centrale de Lyon sous la direction de Cambou. Un logiciel d'identification de paramètres de modèles de comportement à partir de l'essai pressiométrique a été développé



et a été appliqué à différents modèles (*Cambou et Boubanga, 1989 ; Cambou et al., 1990 ; Cambou et Bahar, 1993*).

De la même manière, *Michali et Hicher (1994)* utilisent les résultats d'essais pressiométriques et de laboratoire pour déterminer les paramètres d'une loi élastoplastique (*Hujeux*).

*Zentar (1999)* a utilisé un logiciel d'optimisation couplé à un logiciel d'éléments finis pour identifier certains paramètres d'un modèle élasto-plastique (Cam-clay modifié) à partir des résultats d'essais pressiométrique.

### I.5. Courbe pressiométrique nette

Les courbes enregistrées directement à partir des lectures, sont des courbes brutes qui doivent être corrigées pour tenir compte de l'inertie des sondes, variations de volume de l'appareillage et de la hauteur piézométrique.

#### I.5.1. Correction de la hauteur piézométrique

Par convention, les efforts exercés sur le sol doivent être exprimés en contraintes totales. Ainsi donc, si l'essai est réalisé à une profondeur  $Z$  au dessous de l'appui du pressiomètre, les pressions lues sur le manomètre devront être majorées de la charge égale à la hauteur de la colonne d'eau entre le manomètre et la cellule. Si l'on appelle  $P_m$  la pression lue sur le manomètre, la pression exercée sur le terrain, en négligeant toute autre correction sera donc

$$P = P_m + \gamma_w (Z + a) \quad (I-7)$$

$Z$  : la profondeur au dessus de l'appui du pressiomètre.

$a$  : la constante de compressibilité de l'appareil.

#### I.5.2. Correction de l'inertie

La pression  $P_m$  majorée de la valeur de la hauteur hydrostatique n'est pas la pression exercée effectivement sur le sol. En effet à toute pression  $P_m$  mesurée correspond une déformation de volume lue sur le C.P.V. Pour obtenir la pression qui s'exerce sur la paroi du forage, il faut déduire de la pression  $P_m$  mesurée, l'inertie de la sonde  $P_i$  (membrane, gaine et éventuellement tube fendu).  $P_i$  est la pression nécessaire pour dilater la sonde de la même quantité  $V_m$



- **Courbe d'inertie (courbe d'étalonnage)**

Pour pouvoir procéder aux corrections d'inertie, il suffit de faire essai pressiométrique hors du forage, la sonde étant placées verticalement à coté du CPV. La courbe obtenue est appelée courbe d'inertie.

La pression  $P$  exercée réellement sur la paroi du forage est donnée par la relation suivante :

$$P = P_m - P_i + \gamma_w(Z + a) \quad (I.8)$$

### I.5.3. Correction du volume

Les variations de volume  $V_m$  lues sur le CPV correspondent à :

La déformation du terrain  $V$

La déformation interne  $\Delta V$  des différents éléments du pressiomètre et l'on a :

$$V_m = V + \Delta V \quad (I.9)$$

Pour des pressions ne dépassent pas 25 bars. La compressibilité de l'eau, la variation de volume du CPV et des gaines sont négligeables par rapport à la compressibilité du sol. Cela n'est plus vrai pour les hautes pressions. Pour ce faire, on effectue un essai d'étalonnage en plaçant la sonde dans un tube métallique épais qui peut être considéré en première approximation comme indéformable par rapport à la déformation interne du pressiomètre. Il est clair que les déformations aussi mesurées ne sont que les déformations internes de l'appareil. On tracera alors la courbe d'étalonnage  $\Delta V = f(P)$  à partir de laquelle on détermine la constante de compressibilité de l'appareil :

$$a = \Delta (\Delta V) / \Delta P \quad (I.10)$$

Le volume corrigé correspondant à la déformation volumétrique du sol sera, pour chaque pression  $p_m$  lue sur le manomètre :

$$V = V_m - \Delta V \quad (I.11)$$

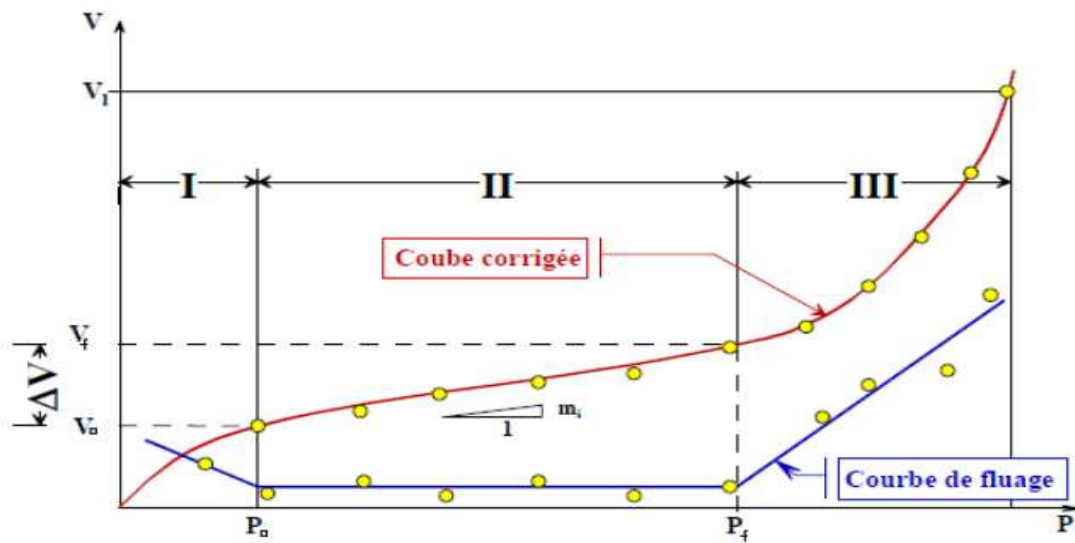


Figure I.9 : Courbe pressiométrique corrigée

### I.6. Forage pressiométrique

Le forage doit être réalisé à l'aide d'outils de foration adaptés au cas par cas au terrain rencontré, conformément aux prescriptions de la norme, afin que :

- Le trou de forage soit correctement calibré au diamètre de la sonde pressiométrique.
- Le sol au bord du trou ne soit pas complètement déstructuré par l'outil et le fluide de foration.

Tableau I.2 : La longueur maximale de forage fait avant l'essai pressiométrique preforé

Nature des terrains	Longueur maximale de forage fait avant l'essai (m)
Vases et argiles molles	1**
Argiles moyennement compactes	3
Argiles compactes, marnes raides	5
limons - au-dessus de la nappe	5
- au dessous de la nappe	3



Sables lâches - au-dessus de la nappe	3
	1**
- au-dessous de la nappe	
Sables moyennement compacts	5
Sols grossiers : graviers, galets, argiles à silex, etc...	5
Roche - altérées - saines	5
	*
* longueur maximale correspondant au poste de travail ** ou intervalle entre deux essais consécutifs	

### I.7. Relation entre $E_m$ et $P_l$

Les caractéristiques tirées de la courbe pressiométrique sont le module de déformation  $E_m$  et la pression limite  $P_l$ , la pression à la rupture ; sont liés par le rapport ( $E_m / P_l$ ) bien qu'il regroupe deux caractéristiques très différentes, du fait que l'une correspond aux petits déplacements du forage et l'autre aux grands, l'expérience a montré que celui-ci peut être un critère pratique pour apprécier et classer la raideur des matériaux étudiés. Ménard propose la classification suivante :

Tableau I.3 : Classification selon le rapport ( $E_m / P_l$ )

Type de sol	Argiles		Limons		Sables		Sables et Graviers	
	$E_m / P_l$	A	$E_m / P_l$	$\alpha$	$E_m / P_l$	$\alpha$	$E_m / P_l$	A
Surconsolidé ou très serré	□ 16	1	□ 14	2/3	□ 12	1/2	□ 10	1/3
Normalement consolidé ou normalement serré	9 à 16	2/3	8 à 14	1/2	7 à 12	1/3	6 à 10	1/4
Sous-consolidé ou altéré et remanié ou lâche	7 à 9	1/2	5 à 8	1/2	5 à 7	1/3		



### I.8. Classification selon le rapport $(E_m / P_l)$

Ce tableau résume la classification des sols par rapport au rapport entre le module pressiométrique et la pression limite.

Tableau I.4 : Relation entre  $E_m$  et le module œdométrique  $E_{oed}$

Argile	$(E_m / P_l) \square 5$	Argile remaniée ou triturée
	$5 \square (E_m / P_l) \square 8$	Argile sous-consolidée
	$8 \square (E_m / P_l) \square 12$	Argile normalement consolidé
	$12 \square (E_m / P_l) \square 15$	Argile légèrement surconsolidée
	$(E_m / P_l) \square 15$	Argile fortement surconsolidée
Sables	$(E_m / P_l) \square 5$	Sable remanié
	$6 \square (E_m / P_l) \square 8$	Sable et gravier immergé
	$(E_m / P_l) \square 10$	Sable et gravier sec et serré

### I.9. Relation entre $E_m$ et le module œdométrique $E_{oed}$

Ménard a défini, un coefficient  $\alpha$  appelé coefficient rhéologique ou coefficient de structure du sol. Ce coefficient fournit la corrélation entre le module pressiométrique et le module œdométrique.

$$E_{oed} = E_m / \alpha \quad (I-12)$$

### I.10. Conclusion

Beaucoup de progrès ont été apportés au développement du pressiomètre du point de vue technologique. L'un des progrès notables apportés à l'appareil est la technique de l'autoforage qui permet de limiter le remaniement du sol. Un autre perfectionnement est l'intégration d'une mesure continue de la pression interstitielle. Ceci permet de suivre de façon très précise la sollicitation appliquée à la paroi du forage, et de disposer d'une information supplémentaire pour caractériser le sol analysé.

Différentes caractéristiques mécaniques sont déterminées par l'essai pressiométrique, à la fois pour la rupture et pour la déformation : pression limite ( $P_l$ ), pression de fluage ( $P_f$ ), module pressiométrique( $E_m$ ).

Grace au forage pressiométrique une description du sol peut souvent être aussi donnée.



INTERPRETATION THEORIQUE DE L'ESSAI  
PRESSIOMETRIQUE

**II.1. Introduction**

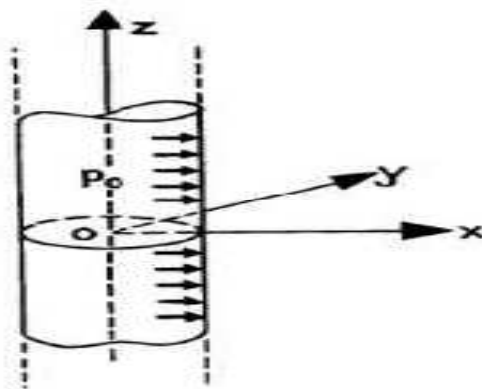
L'essai pressiométrique peut être schématisé par l'expansion d'une cavité cylindrique dans un massif de sol infini, une pression étant appliquée sur la paroi interne de la cavité. L'analyse théorique de ce problème a fait l'objet d'un grand nombre d'études, plus ou moins complexes, suivant les hypothèses prises en compte. Ces hypothèses concernent les points suivants l'approche en petites ou en grandes déformations.

**II .2. Théorie de l'expansion d'une cavité cylindrique**

Le problème de l'expansion d'une cavité cylindrique en élasticité linéaire a été résolu dès (1852) par Lamé, ce n'est qu'à partir de (1950) qu'une phase plastique fut introduite dans l'analyse (Hill, 1950; Ménard, 1957; Salençon, 1966). Ménard fut le premier à s'appuyer sur des études expérimentales, études essentiellement menées sur des argiles.

**II.2.1. Concept de base**

Considérons une cavité cylindrique de rayon initial  $r_0$  et de longueur infinie dans un sol infini, isotrope et homogène. L'axe de la cavité est vertical et représente la direction OZ. La pression initiale  $p_0$  existant sur la paroi de la cavité correspond à la pression horizontale des terres au repos  $\sigma h_0$ , présente également dans toute la masse de sol.



**Figure II .1 : État initial d'une cavité cylindrique dans un milieu infini  
(D'après Baguelin et al, 1978)**



INTERPRETATION THEORIQUE DE L'ESSAI  
PRESSIOMETRIQUE

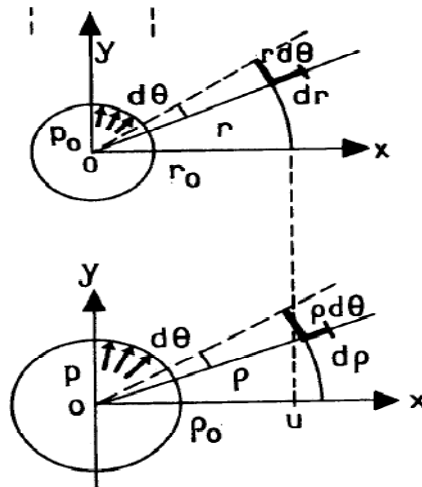


Figure II -2 : D'après Baguelin et al. 1978

Un élément linéaire  $dr$  orienté radialement subira une contraction, alors qu'un élément linéaire  $r d\theta$  augmentera de longueur tout en restant perpendiculaire à  $dr$ . Les directions radiales et circonférentielles représentent donc les directions principales et les déformations correspondantes,  $\epsilon_r$  et  $\epsilon_\theta$ , sont données par :

$$\epsilon_r = \frac{du}{dr} \quad (II.1)$$

$$\epsilon_\theta = \frac{(r+U)d\theta - rd\theta}{rd\theta} = \frac{u}{r} \quad (\text{équation d'équilibre}) \quad (II.2)$$

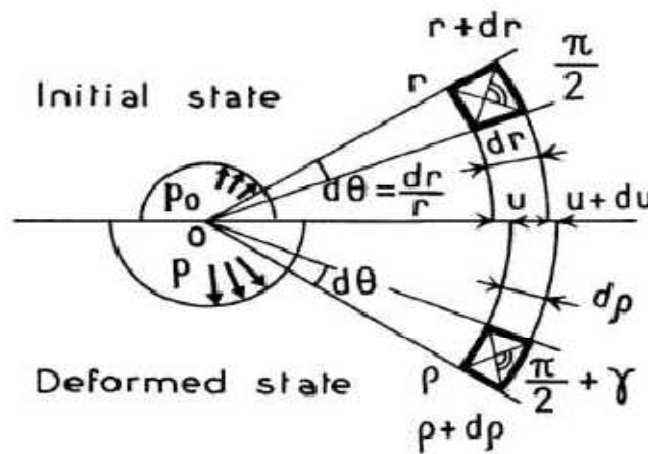


Figure II .3 : État initial et déformé d'un élément de volume proche d'une cavité cylindrique

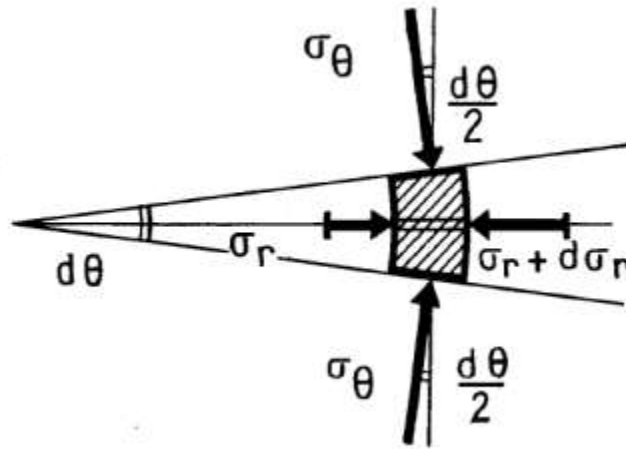


Figure II .4 : État des contraintes sur un élément déformé

La figure montre les déformations subies par un élément de volume suite à l'expansion de la cavité alors que la figure montre l'état des contraintes agissant sur l'élément de volume. Une seule équation d'équilibre décrivant cet état existe dans le plan horizontal pendant l'augmentation du rayon  $r$  à petites déformations :

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (\text{II.3})$$

### II-2.3 L'expansion en phase élastique :

On a les conditions aux limites de l'expansion d'une cavité cylindrique :

$$\begin{aligned} \sigma_r &= 0 && \text{pour } r = \infty \\ \sigma_r &= P_0 && \text{pour } r = r_0 \end{aligned} \quad (\text{II.4})$$

Après intégration, l'équation d'équilibre s'écrit comme suit, (c'est les résultats de Lamé)

$$\sigma_r = p_0 + (P - p_0) \frac{r_0^2}{r^2} \quad (\text{II.5})$$

$$\sigma_r = p_0 + (P - p_0) \frac{r_0^2}{r^2} \quad (\text{II.6})$$

$$\sigma_r = p_0 \quad (\text{II.7})$$



#### II-3.1 Méthodes d'interprétation basée sur un calcul analytique

La plupart de ces analyses sont basées sur la théorie classique des corps élastoplastique en prenant un critère de Mohr –Coulomb, qui est la base de la mécanique des sols traditionnels. Plusieurs méthodes d'interprétation sont proposées ; on peut citer :

##### II-3.1.1 Méthode Ménard

En supposant que le sol admet le critère de plasticité du type Mohr-Coulomb. Pour un sable purement frottant (cohésion nulle) Ménard a donné

$$P_l = p_0(1 + \sin \varphi) \left[ \frac{E}{2(1+\nu)p_0 \sin \varphi} \right]^{\frac{\sin \varphi}{1+\sin \varphi}} \quad (\text{II.8})$$

##### II-3.1.2 Méthode de la sous tangente

Cette méthode permet de déterminer la cohésion non drainée du sol. Les hypothèses prises en compte par les auteurs sont les suivantes :

- Essai drainé
- Hypothèse de déformation plane
- Influence de la pression moyenne négligée

Au bord de la sonde pressiométrique la déformation  $\epsilon_0$  est connue en fonction du déplacement de la paroi  $u_0$  et du rayon  $r_0$ .

$$\epsilon_0 = u_0 / r_0. \quad (\text{II.9})$$

Les données de la courbe pressiométrique non drainée permettent donc de retrouver la loi de cisaillement :

$$\tau = f(\epsilon_0) = dF / d \epsilon_0 \quad (\text{II.10})$$

Selon Baguelin

La déformation radiale s'écrit :  $\epsilon_r = \frac{dU_r}{dr}$  (II.11)

La déformation tangentielle :  $\epsilon_\theta = \frac{U_r}{r}$  (II.12)



INTERPRETATION THEORIQUE DE L'ESSAI  
PRESSIOMETRIQUE

Cette méthode n'est pas stable numériquement car la détermination des tangentes est très difficile sur la courbe expérimentale. On doit utiliser des algorithmes de lissage pour avoir des résultats interprétables pour pallier cette difficulté, Baguelin et al 1972 proposent l'expression suivante qui donne une approximation de la courbe pressiométrique par la formule analytique suivante :

$$p = p_0 + \frac{1}{2b} [\log(1 + \epsilon_0^2)] + 2 \text{Arctg} \epsilon_0 \quad (\text{II.13})$$

a et b sont des constantes qui sont déterminées par ajustement de la courbe théorique sur la courbe expérimentale. La courbe pressiométrique est donnée par la courbe suivante :

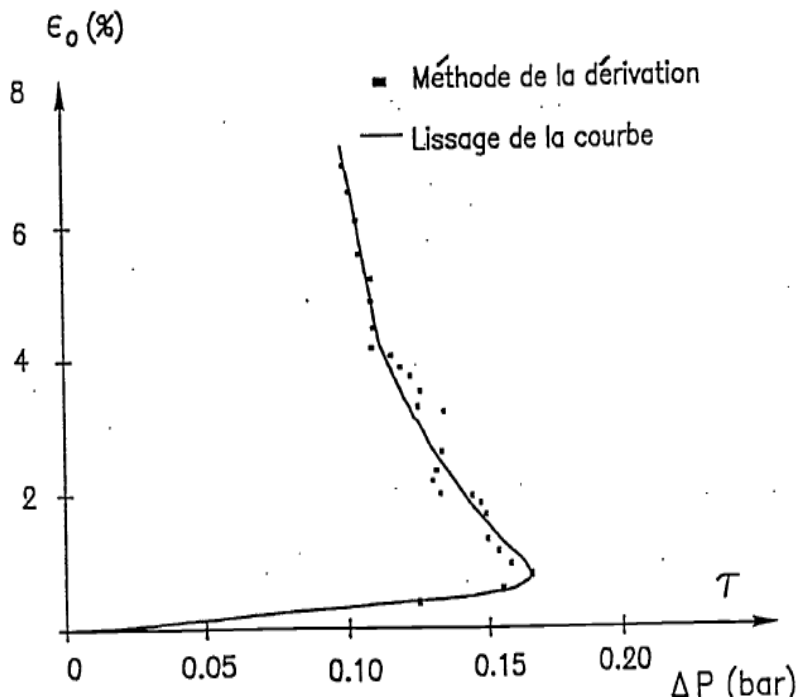


Figure II .5 : Méthode de la sous tangente

La valeur de la cohésion non drainée  $C_u$  correspond à la valeur du pic de la sous-tangente à la courbe pressiométrique.



### INTERPRETATION THEORIQUE DE L'ESSAI PRESSIOMETRIQUE

#### II.4 Conclusion

Depuis sa mise au point par Louis Ménard en 1957, l'essai pressiométrique connaît un essor considérable. Ce succès est dû à de nombreux avantages, comme la simplicité relative d'exécution, la rapidité des mesures et la polyvalence de l'essai (essai praticable dans tous les types de sols).

- Le pressiomètre est le seul appareil d'essai in situ qui mesure à la fois une caractéristique de déformabilité et une caractéristique de résistance du sol.

Le domaine privilégié d'utilisation du pressiomètre est le dimensionnement des fondations dans les sols.



### III.1. Introduction

Depuis une vingtaine d'années, encouragées par l'augmentation exponentielle du calcul des ordinateurs et une diminution des coûts d'accès et de mise en œuvre, les méthodes numériques ont connu un développement très important dans les bureaux d'études et les centres de recherches en géotechnique.

Leur utilisation est aujourd'hui très courante, et la conception de grands projets passe forcément par des analyses de ce type afin de vérifier la stabilité des ouvrages en interaction avec leur environnement, et de contrôler que les valeurs des déplacements et des contraintes soient admissibles, et d'aider au dimensionnement des structures.

### III.2. Les lois de comportement

Le comportement des sols est très complexe ; il n'est pas linéaire, il est irréversible et dépend du chemin de contrainte suivi auparavant.

Il est donc évident qu'une loi mathématique capable de reproduire tous les aspects du comportement d'un sol serait excessivement complexe. En effet, bien qu'on a réalisé des progrès considérables dans ce domaine ces dernières années, il n'existe pas actuellement un modèle capable de décrire parfaitement le comportement mécanique des sols.

Les lois de comportement qui décrivent bien le comportement des sols sont complexes et demande pour la détermination des paramètres qu'elles contiennent, des études spécifiques lourdes sortant du cadre des projets d'ingénierie même complexe.

En plus des difficultés qui existent dans l'intégration de ces lois de comportement dans des codes numériques. Peu de codes sont opérationnels actuellement, avec des lois sophistiquées, le coût de ces calculs est généralement important.

### III.3. Modèles de comportement

#### III.3.1. Modèle élastique linéaire isotrope

Les lois de comportement relient les sollicitations appliquées  $\sigma_{ij}$  à la réponse en déformations des matériaux  $\varepsilon_{ij}$ . Dans le cas de l'élasticité linéaire isotrope, le tenseur des déformations est relié au tenseur des contraintes par la relation de Hooke qui adopte les formes établies dans l'équation III.1 et dans l'équation III.2



$$\boldsymbol{\varepsilon}_{ij} = \frac{(1+\nu)}{E} \boldsymbol{\sigma}_{ij} - \frac{\nu}{E} \boldsymbol{\sigma}_{KK} \boldsymbol{\delta}_{ij} \quad (\text{III .1})$$

$$\boldsymbol{\sigma}_{ij} = \frac{E}{(1+\nu)} \boldsymbol{\varepsilon}_{ij} + \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \boldsymbol{\varepsilon}_{KK} \boldsymbol{\delta}_{ij} \quad (\text{III .2})$$

Où E et  $\nu$  sont le module d'Young et le coefficient de Poisson et  $\boldsymbol{\delta}_{ij}$  est l'indice de Kronecker. Le modèle rhéologique relatif à l'élasticité linéaire peut être représenté par un ressort de raideur E.

Dans le code de calcul Flac, l'écriture des relations de comportement utilise les modules, volumique K et de cisaillement G, plutôt que le module d'Young et le coefficient de Poisson.

### III.3.2. Modèles de comportement élastoplastique

Un comportement de type élastique linéaire isotrope ne peut être utilisé qu'en première approche car il ne permet pas de prendre en compte de déformations irréversibles.

La plupart des matériaux sont, en effet, élastoplastiques, leur comportement est caractérisé par l'apparition de déformations élastiques et de déformations irréversibles.

La déformation totale est la somme des déformations élastiques  $\boldsymbol{\varepsilon}_e$ , et plastiques  $\boldsymbol{\varepsilon}_p$ .

Elle est donnée par l'équation suivante :

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\varepsilon}^e + \boldsymbol{\varepsilon}^p \quad (\text{III .3})$$

Les modèles élastoplastiques sont basés sur trois notions fondamentales : la surface de charge, la règle d'écrouissage et la règle d'écoulement.

### III.3.3. Modèle élastique linéaire parfaitement plastique de Mohr Coulomb

C'est le modèle choisi dans ce travail ; cette loi de comportement se caractérise par une élasticité linéaire isotrope de Hooke (E,  $\nu$ ), une surface de charge  $F(\boldsymbol{\sigma}_{ij})$  et un potentiel plastique  $G(\boldsymbol{\sigma}_{ij})$ . C'est un modèle à cinq paramètres, dont deux paramètres élastiques : E et  $\nu$  et trois paramètres de rupture ( $c$ ,  $\varphi$  et  $\Psi$ ) tels que :

**E** : Module d'Young

**$\nu$**  : Coefficient de Poisson

**$\varphi$**  : Angle de frottement

**$\Psi$**  : Angle de dilatanc



### III.4. Présentation du logiciel Flac

#### III.4 .1. Introduction

Le logiciel de modélisation en deux dimensions FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua) est un logiciel de différences finies, il permet de simuler le comportement des structures établies dans les sols, les roches, ou d'autres matériaux. Il permet de mener à bien des études complexes de géotechnique et d'interaction sol roche/structure.

Plusieurs modèles de comportement du matériau sont introduits dans FLAC comme, le modèle linéaire élastique, le modèle élasto-plastique de Mohr-Coulomb et le modèle élastoplastique avec écrouissage de Cam Clay Modifié.

De plus, FLAC intègre une interface de modélisation et un langage de programmation interne (langage Fish), qui permet à l'utilisateur d'introduire des nouvelles lois de comportement, ou encore de déterminer facilement les données dans des points précis du maillage.

### III.5. Méthodologie de simulation avec Flac

Afin de réaliser une simulation avec Flac, il faut suivre les étapes logiques suivantes :

- Définir la géométrie.
- Introduire les modèles de comportement.
- Introduire les éléments de structure, s'il y a lieu.
- Préciser les conditions aux frontières.
- Application du poids propre, s'il y a lieu.
- Résoudre pour calculer les contraintes initiales au repos.
- Introduire le chargement.
- Résoudre ou appliquer le nombre de cycles requis.
- Puis, introduire les modifications requises.

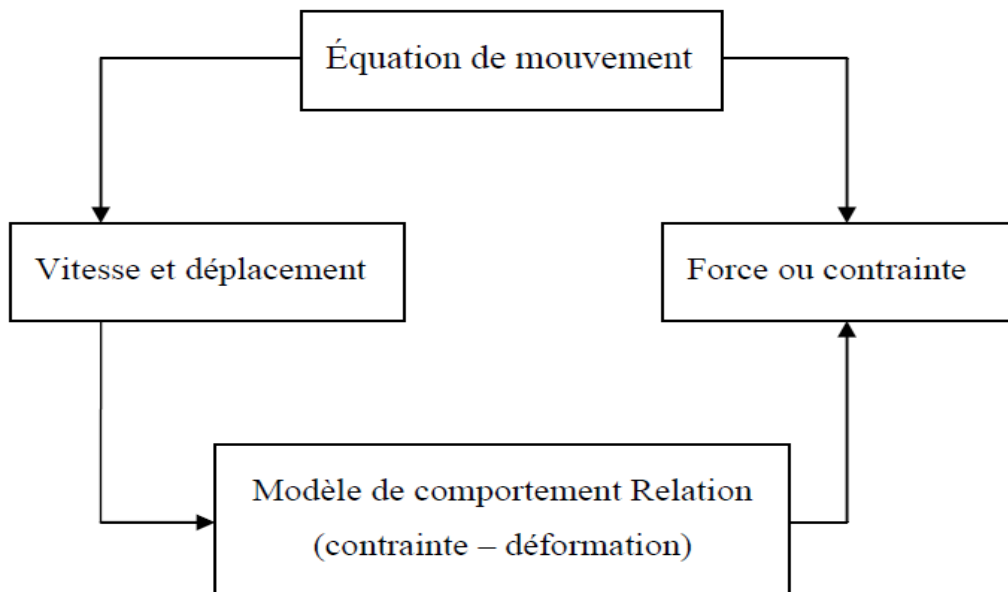


Figure III.1 : Séquence de calcul (d’après Itsaca 2005)

### III.6. Modélisation d'un essai Pressiométrique

La cavité cylindrique peut être modélisée avec plusieurs formes de maillage. Diab (2000) a utilisé pour simuler l'essai du cylindre creux, deux modèles de maillage : le premier qui représente une géométrie à symétrie axiale où la cavité est représentée par une coupe verticale passant par qui représente coupe horizontale du cylindre creux et l'axe de la sonde, et le deuxième modèle, qui est un modèle de déformation plane, le plan d'analyse est perpendiculaire à l'axe de la sonde.

Dans le cas de l'essai pressiométrique, l'expansion de la sonde cylindrique en déformation plane de sol horizontale a été modélisée pour représenter le sol autour de la sonde (figure III.2).

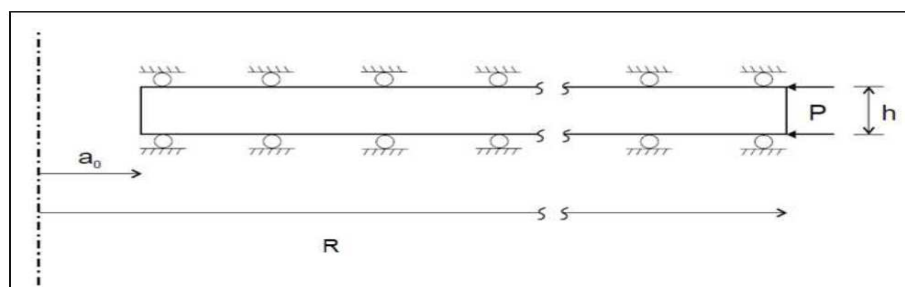


Figure III.2 : Modèle de maillage utilisé en conditions axisymétriques



### II.6.1. Génération du maillage

Le chargement de la sonde pressiométrique est appliqué sur une face de forage, dit être resserré au voisinage de la sonde et ce raffinement diminue au fur et à mesure qu'on s'éloigne de la sonde.

Pour ce travail on a choisi un maillage de (30,1).

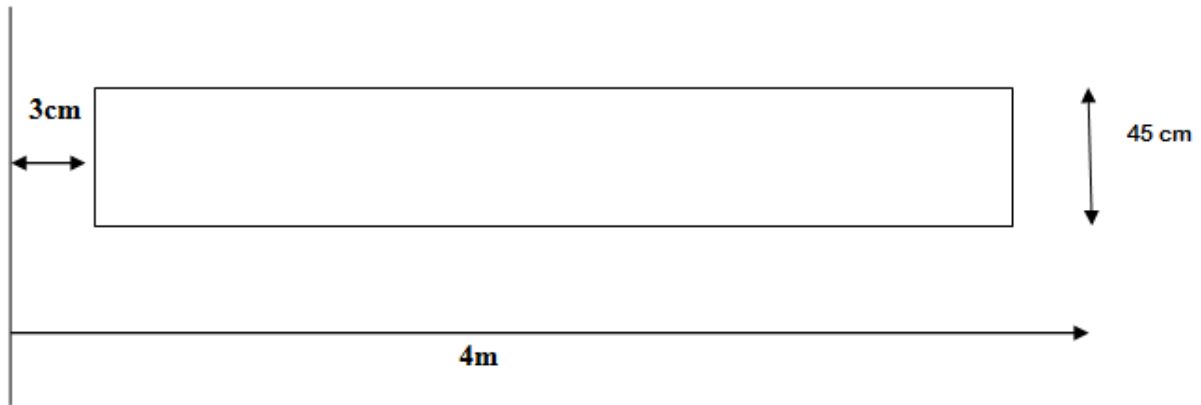


Figure III.3 : Dimension de la grille

### II.6.2 Finesse du maillage

Le choix du maillage a une grande influence sur la précision des résultats.

La finesse du maillage dépend du modèle de sol choisi, ainsi que de la précision requise des résultats.

C'est la raison pour laquelle plusieurs simulations ont été effectuées pour déterminer le nombre d'éléments dans chacun des maillages qui satisfait à la fois une précision acceptable et un temps de calcul raisonnable.

Les figures (III.4.a et b) montrent une comparaison des résultats obtenus par un maillage de 60 éléments et un autre maillage de 30 éléments. Ce dernier maillage présenté par le manuel de FLAC dans l'exemple de l'expansion d'une sonde cylindrique, a été adopté pour les simulations.

Étant donné que le chargement du sol correspond à un déplacement radial sur la face intérieure de la sonde, le maillage doit être densifié au voisinage de cette face.

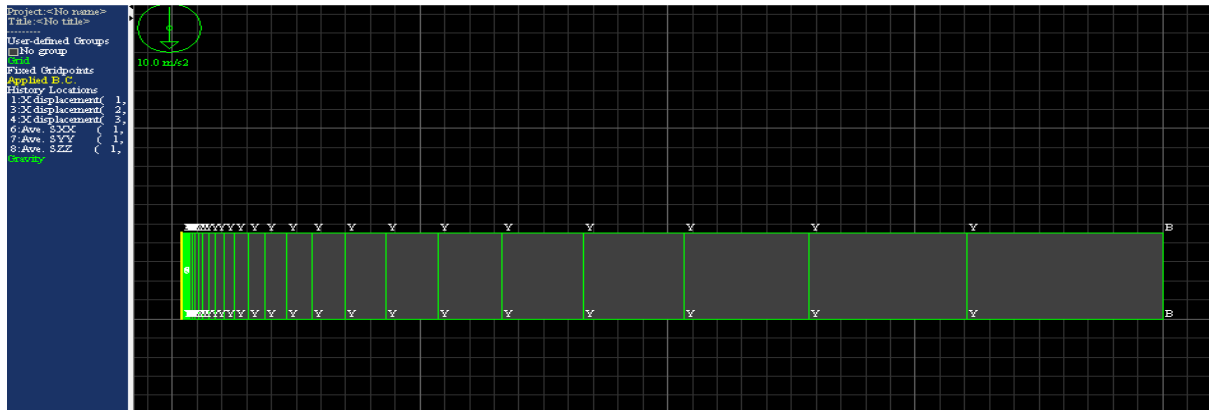


Figure III.4.a : Maillage du sol autour de la cavité (30 éléments)

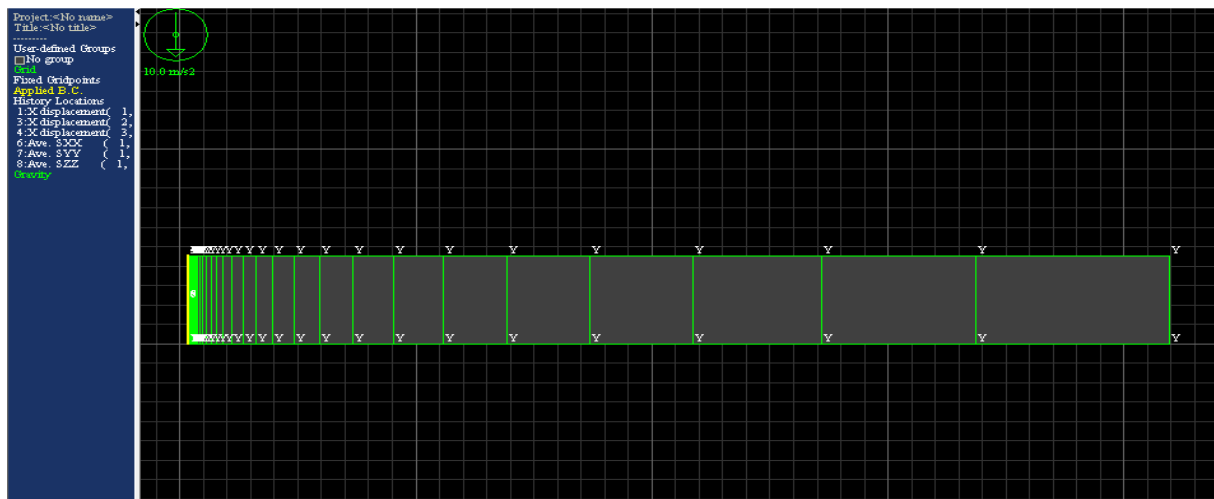


Figure III.4.b Maillage du sol autour de la cavité (60 éléments)

On remarque que le temps de calcul pour un maillage de 60 est beaucoup plus grand qu'un maillage de 30.

### III.6 .3. Conditions aux limites

- Loin de la sonde, le sol ne se déforme pas, on impose un déplacement nul suivant l'axe  $xx'$  à 4m.

$$dx = dx_0 \quad \text{pour} \quad r = r_0$$

$$dx = 0 \quad \text{pour} \quad r = r_0$$

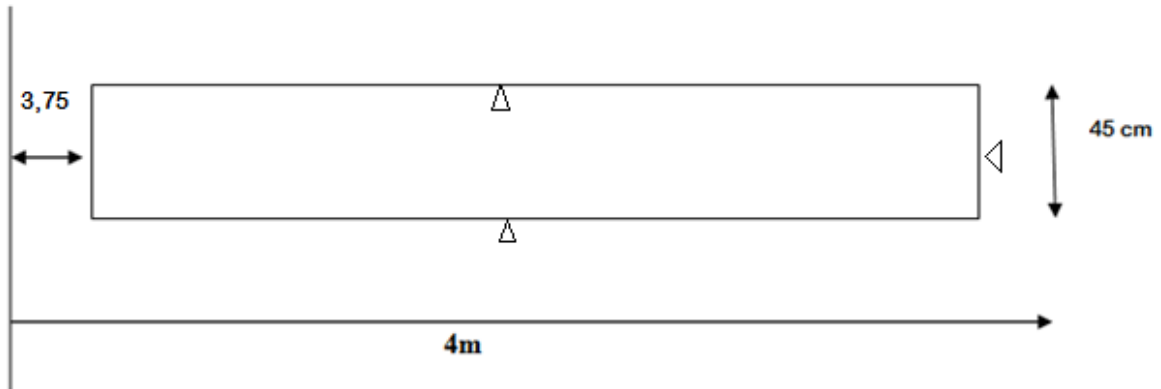


Figure III.5 : Conditions aux limites

### III.7. Conclusion

Ce chapitre était consacré à la présentation du code de calcul utilisé dans ce travail, qui est Flac 2D qui nous a permis de modéliser un essai pressiométrique, en faisant un choix de maillage et des conditions aux limites, et initiales ainsi le modèle utilisé.



### IV.I. Introduction

Dans ce chapitre on se propose d'analyser les essais pressiométriques réalisés par le laboratoire national de l'Habitat et de la construction (LNHC), réalisée sur un sol d'un terrain devant recevoir un projet de tours en promotion immobilière de type centre d'affaire et logements.

Le projet est situé sur le parking du Supermarché des Galeries Algériennes de la rue de La liberté de Bejaia. Les limites du projet sont les suivantes :

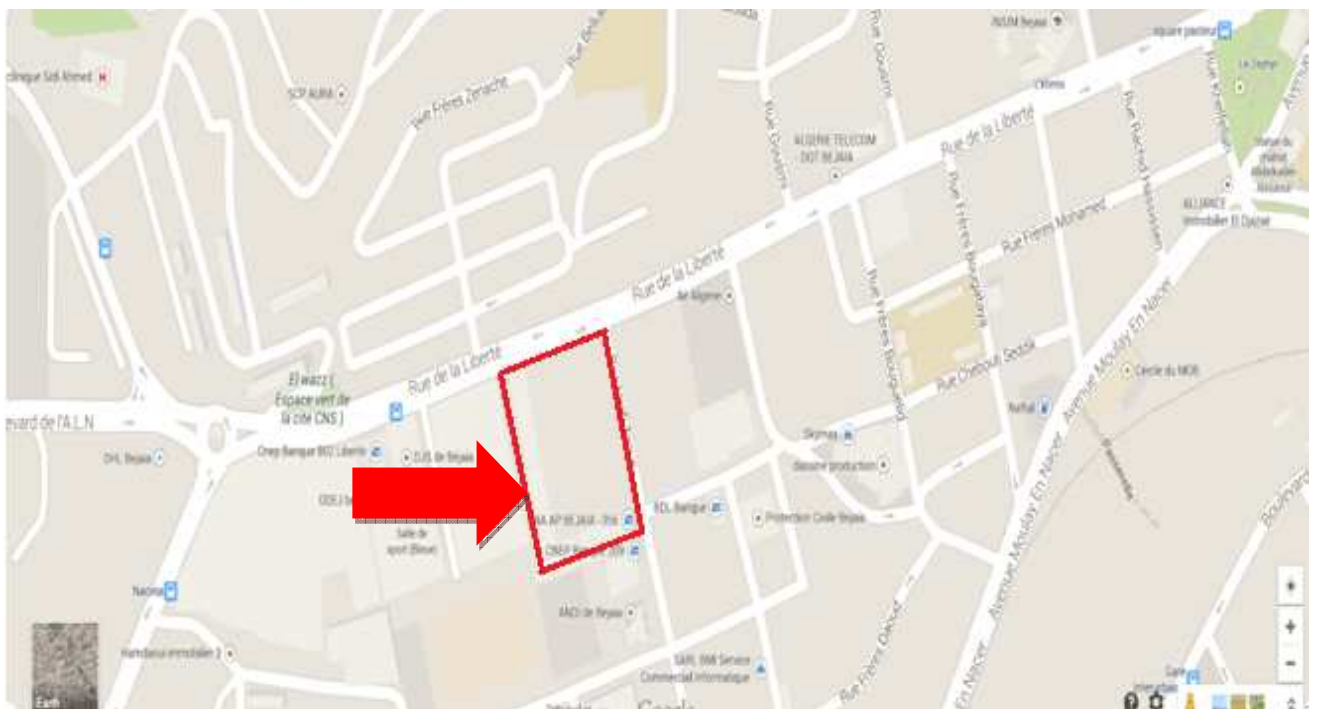
Au Nord par la rue de liberté

Au Sud par le Supermarché

A l'Est par la rue de Taous HARFI

A l'Ouest par le siège de la banque BADR

La figure ci-dessous a été prise par Google maps afin de situer le terrain du projet



**Figure IV.1 : Situation du site à l'échelle de la wilaya**



### IV.2. Le sondage pressiométrique

Un sondage pressiométrique est défini par une succession de deux opérations essentielles qu'on peut citer :

- Un forage pressiométrique (détailler dans le chapitre I).
- Un ou des essais pressiométriques.

Pour ce projet les essais pressiométriques ont été réalisés par un pressiomètre autoforeur. On a appliqué une pression uniforme sur la paroi du forage, et on a mesuré l'expansion de la sonde en fonction de la pression appliquée. On a réalisé trois sondages pressiométriques, les essais pressiométriques sont effectués tous les mètres à partir de 2,00m jusqu'à 12,00m.

### IV.3. La reconnaissance du sol

Les sondages carottés, et les sondages pressiométriques ont montré la présence des couches suivantes :

On peut conclure que le sol est composé principalement de trois grandes couches géotechniques :

- **La couche A**

Cette couche a une épaisseur de 7 à 12m en moyenne elle est composée d'alluvions, sables, limons, galets.

- **La couche B**

C'est une couche intermédiaire a une épaisseur de 7 à 15 m elle est composée de marnes graveleuses, sableuse.

- **La couche C**

C'est la dernière couche rencontrée en dessous de la couche B jusqu'à la fin du sondage jusqu'à la profondeur de 30m. Elle est composée de schiste marneux.

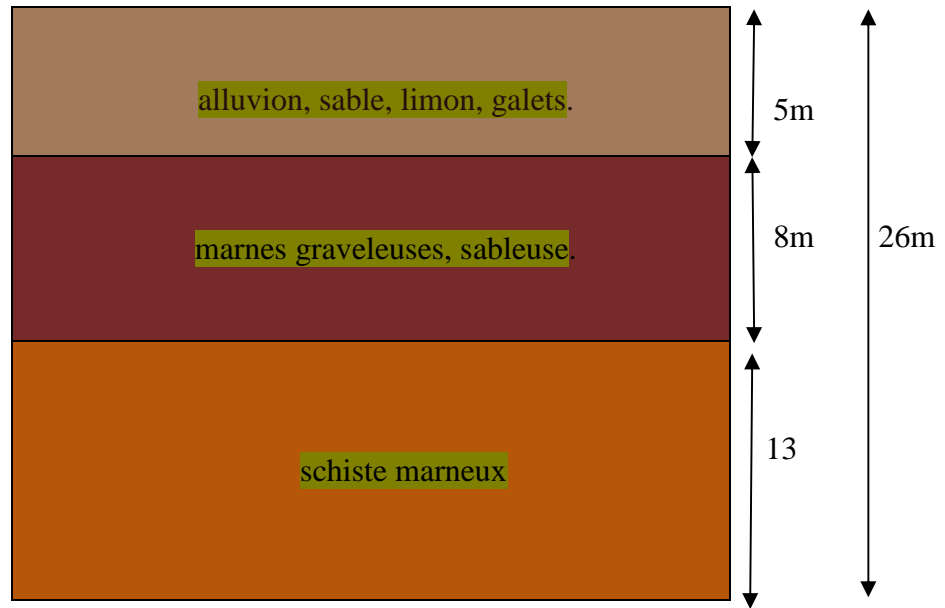


Figure VI.2 : les différentes couches géotechniques

#### IV.4. le but de l'étude

D'après cette campagne de reconnaissance plusieurs courbes brutes on été tracées, quelques exemples sont représentées ci-dessous :

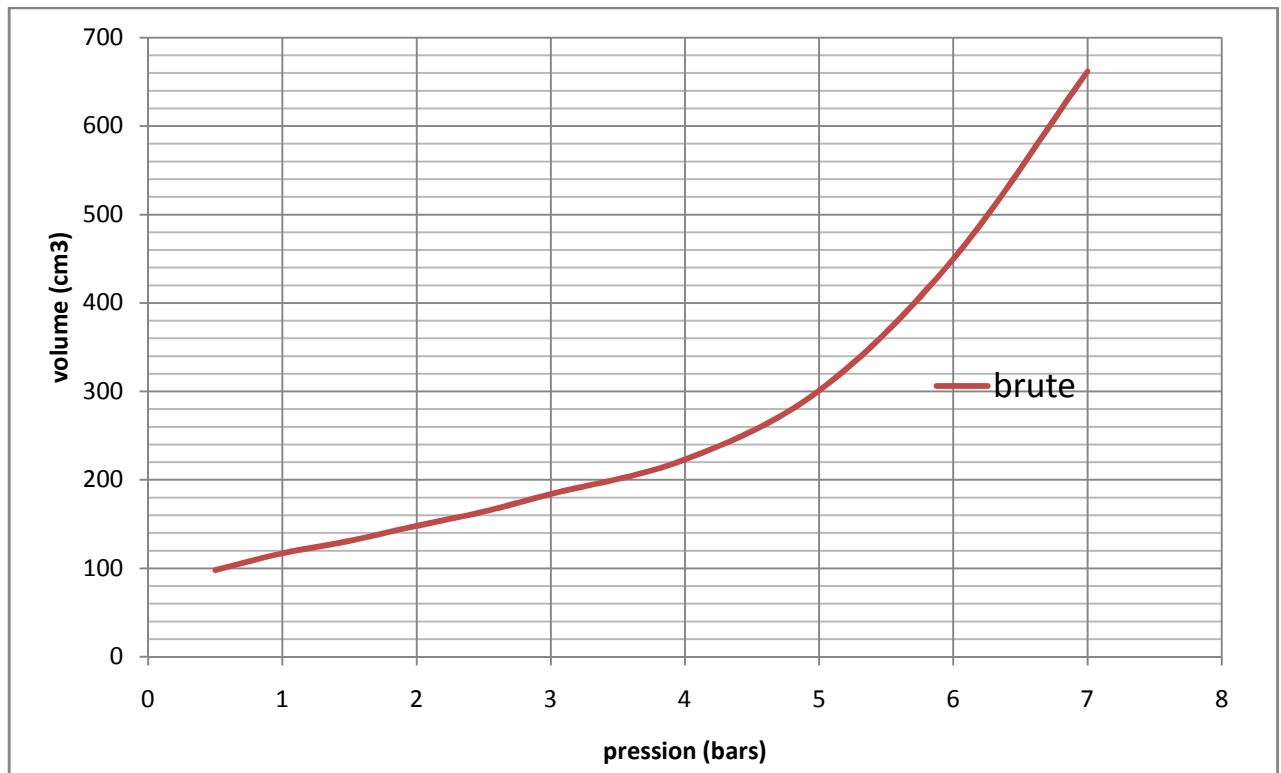


Figure VI.3 : Courbe brute a une profondeur de 3m (SP2)

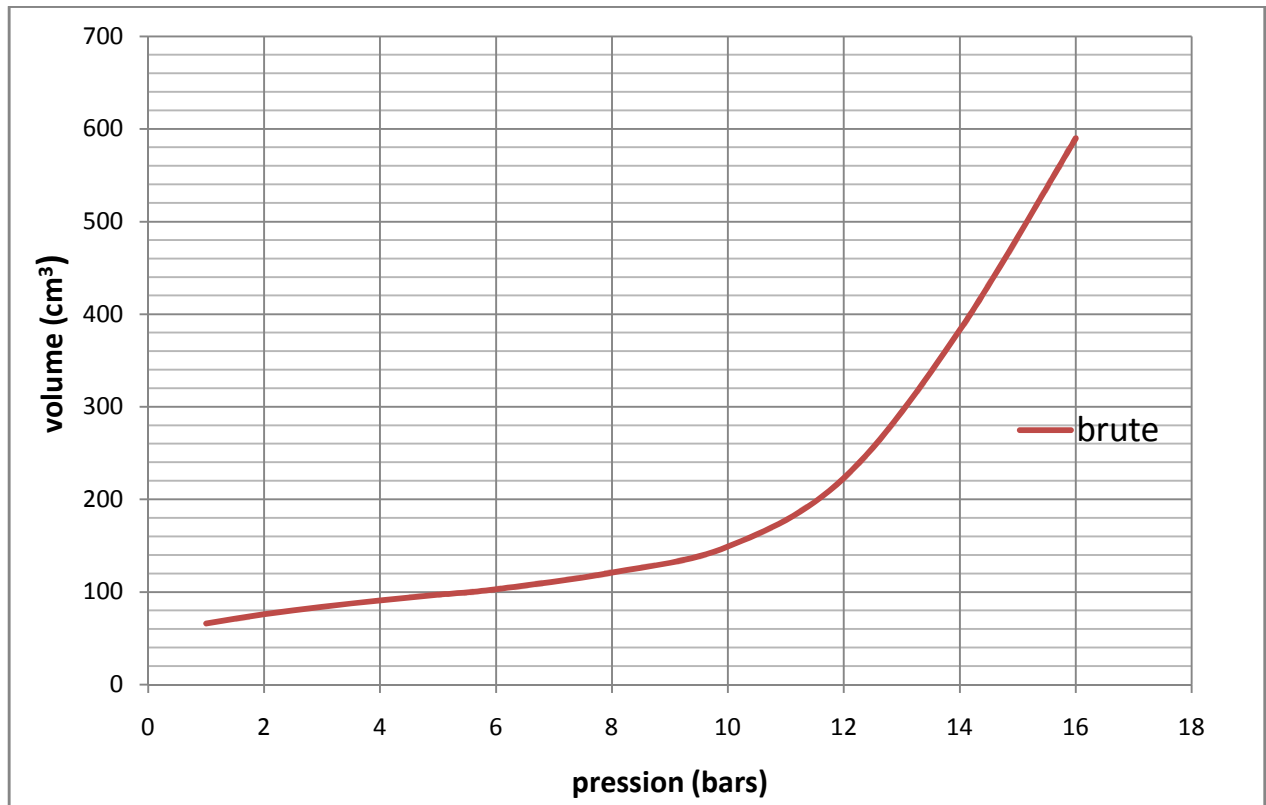


Figure VI.4 : Courbe brute a une profondeur de 11m (SP1)

#### IV.5. Correction des courbes

Pour pouvoir procéder aux corrections de l'inertie il suffit de faire un essai pressiométrique hors du forage, la sonde étant placée verticalement à coté du CPV. La courbe obtenue est appelée courbe d'étalonnage représentée sur les figure ci-dessous :



IV.5. 1. Les courbes d'étalonnages

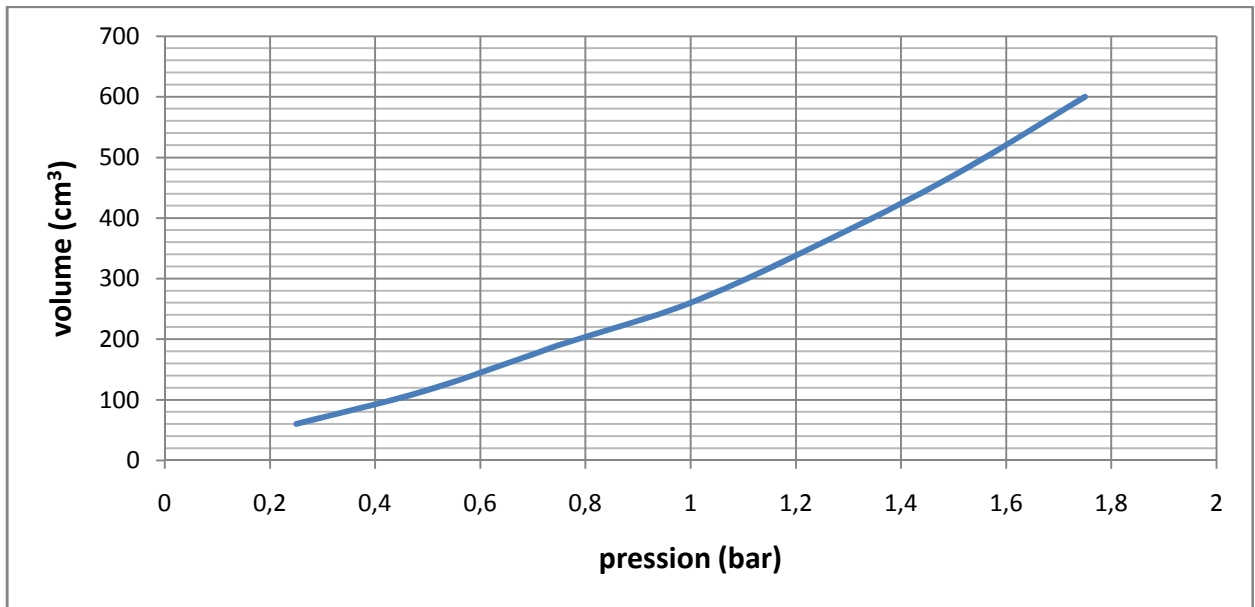


Figure IV.5 : La courbe d'étalonnage 1

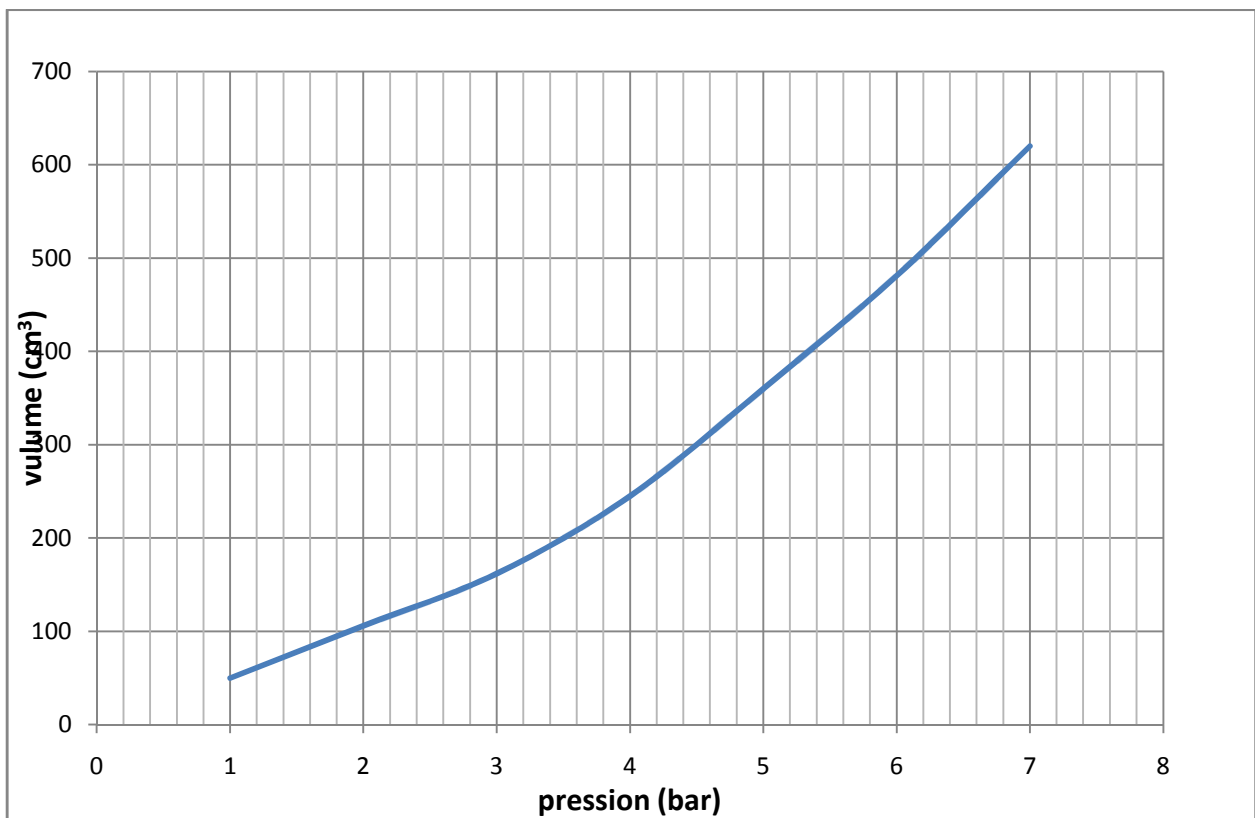


Figure IV.6 : La courbe d'étalonnages 2



$$P = p_m - p_i + \sigma_w (Z + a) \quad (\text{IV.1})$$

A partir de la courbe d'étalonnage  $\Delta V=f(P)$  on détermine la constante de compressibilité de l'appareil

$$a = \Delta (\Delta V / \Delta P) \quad (\text{IV.2})$$

$$\frac{\Delta P}{\Delta V} = \frac{P_f - P_0}{V_f - V_0} = \frac{1,75 - 0,25}{600 - 60} = 0,002$$

$$a = 0,002$$



IV.5.2. Les courbes corrigées

IV.5.2.1 Sondage pressiométrique 1

Tableau IV.1 : Valeur de la pression et le volume à 2m

Pression (bar)	Volume (cm <sup>3</sup> )	$\Delta V$ (cm <sup>3</sup> )	Volume corrigé	Pression corrigée
0,5	160	30	130	0,45
1	176	19	157	0,7
1,5	230	12	218	0,95
2	280	6	274	1,2
2,5	327	9	318	1,45
3	380	10	370	1,7
3,5	442	20	422	1,95
4	526	26	500	4,2
4,5	641	31	610	4,7

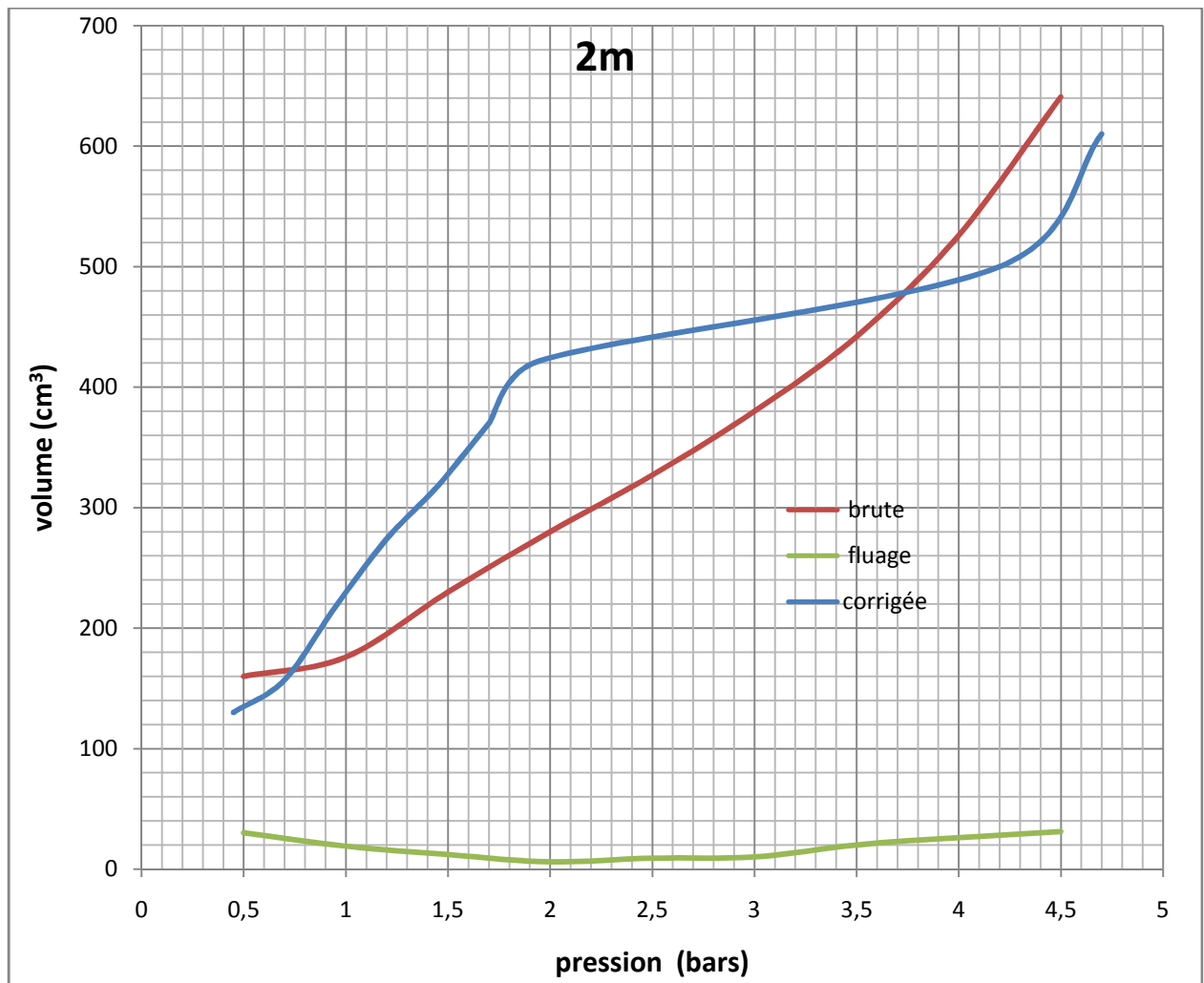


Figure IV.7 : la courbe brute et la courbe corrigée à 2m



Tableau IV.2 : Valeur de la pression et le volume à 2m

Pression (bar)	Volume (cm <sup>3</sup> )	$\Delta V$ (cm <sup>3</sup> )	Volume corrigé	Pression corrigée
0,5	98	8	90	0,45
1	112	4	108	0,7
1,5	132	2	130	0,95
2	155	5	150	1,2
2,5	174	4	170	1,45
3	196	4	192	1,7
3,5	222	5	217	1,95
4	256	6	250	4,2
5	368	36	332	5,2
6	526	44	482	6,2

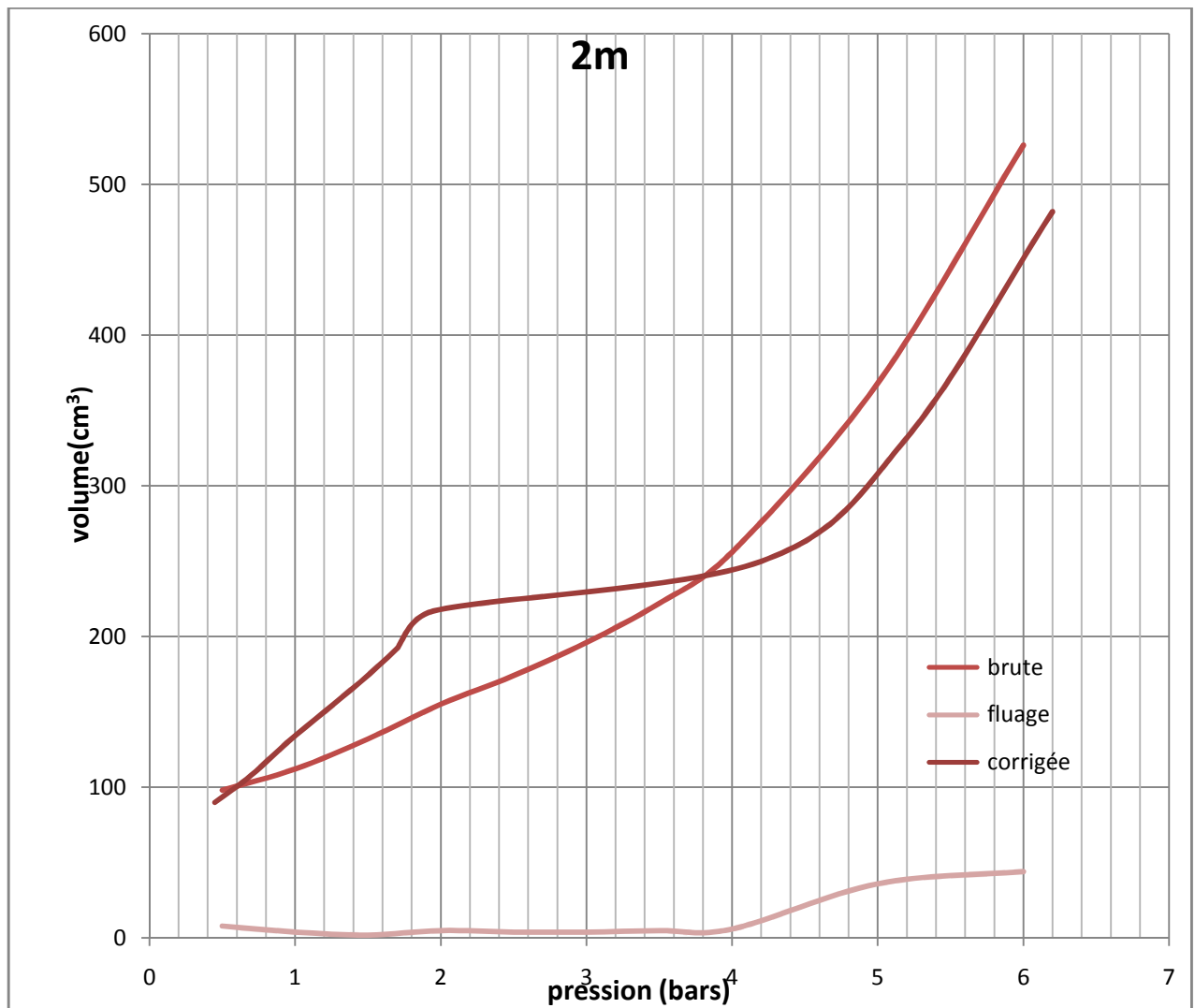


Figure IV.8 : la courbe brute et la courbe corrigée à 2m



Tableau IV.3 : Valeur de la pression et le volume à 3m

Pression (bar)	Volume (cm <sup>3</sup> )	$\Delta V$ (cm <sup>3</sup> )	Volume corrigé	Pression corrigée
0,5	100	13	87	0,55
1	124	4	120	0,8
1,5	138	2	136	1,05
2	153	2	151	1,3
2,5	170	2	168	1,55
3	182	2	180	1,8
3,5	210	4	206	2,05
4	227	4	223	4,3
5	272	12	260	5,3
6	404	32	372	6,3
7	620	49	571	7,3

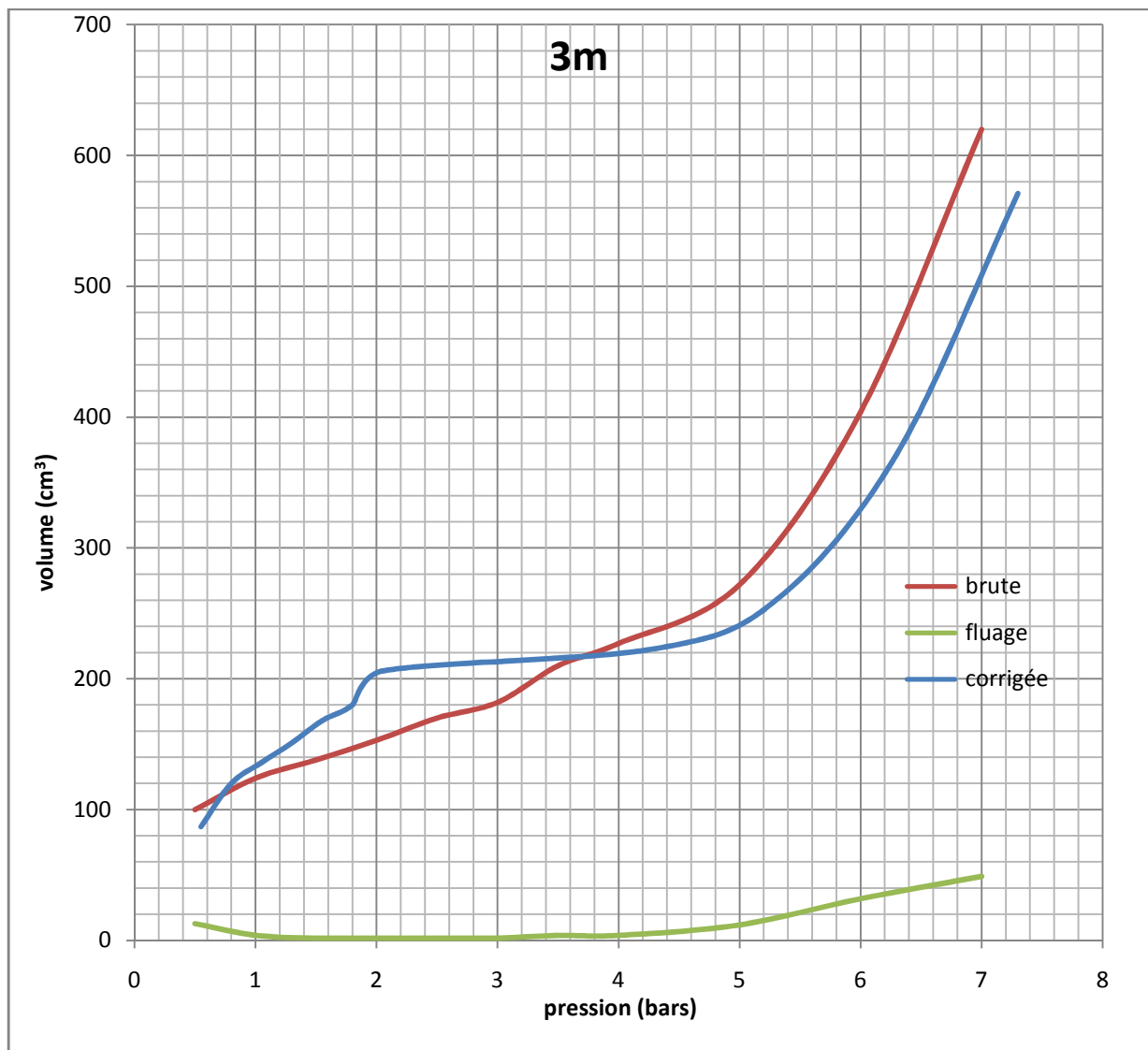




Figure IV.9 : la courbe brute et la courbe corrigée à 3m

Tableau IV.4 : Valeur de la pression et le volume à 4m

Pression (bar)	Volume (cm <sup>3</sup> )	$\Delta V$ (cm <sup>3</sup> )	Volume corrigé	Pression corrigée
0,5	116	8	108	0,65
1	133	2	131	0,9
1,5	143	2	141	1,15
2	154	2	152	1,4
2,5	165	2	163	1,65
3,5	178	2	176	2,4
4	217	7	210	2,65
5	279	19	260	5,4
6	400	39	361	6,4
7	620	64	556	7,4

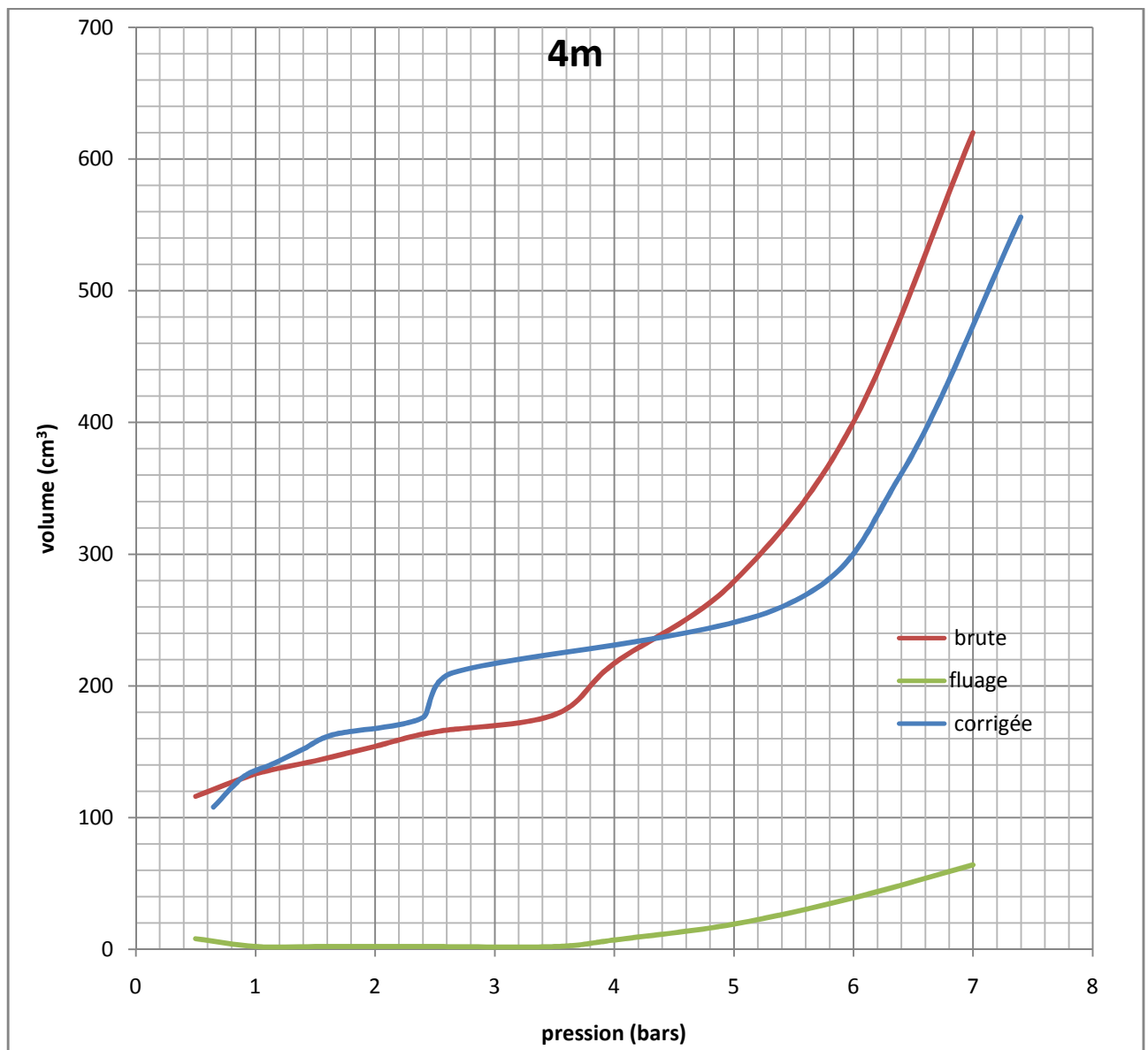


Figure IV.10 : la courbe brute et la courbe corrigée à 4m



Tableau IV.5 : Valeur de la pression et le volume à 5m

Pression (bar)	Volume (cm <sup>3</sup> )	$\Delta V$ (cm <sup>3</sup> )	Volume corrigé	Pression corrigée
0,5	120	8	112	0,75
1	135	3	132	1
1,5	144	2	142	1,25
2	159	3	156	1,5
2,5	183	4	179	1,75
3	206	6	200	2
4	269	19	250	2,75
5	380	40	340	5,5
6	610	60	550	6,5

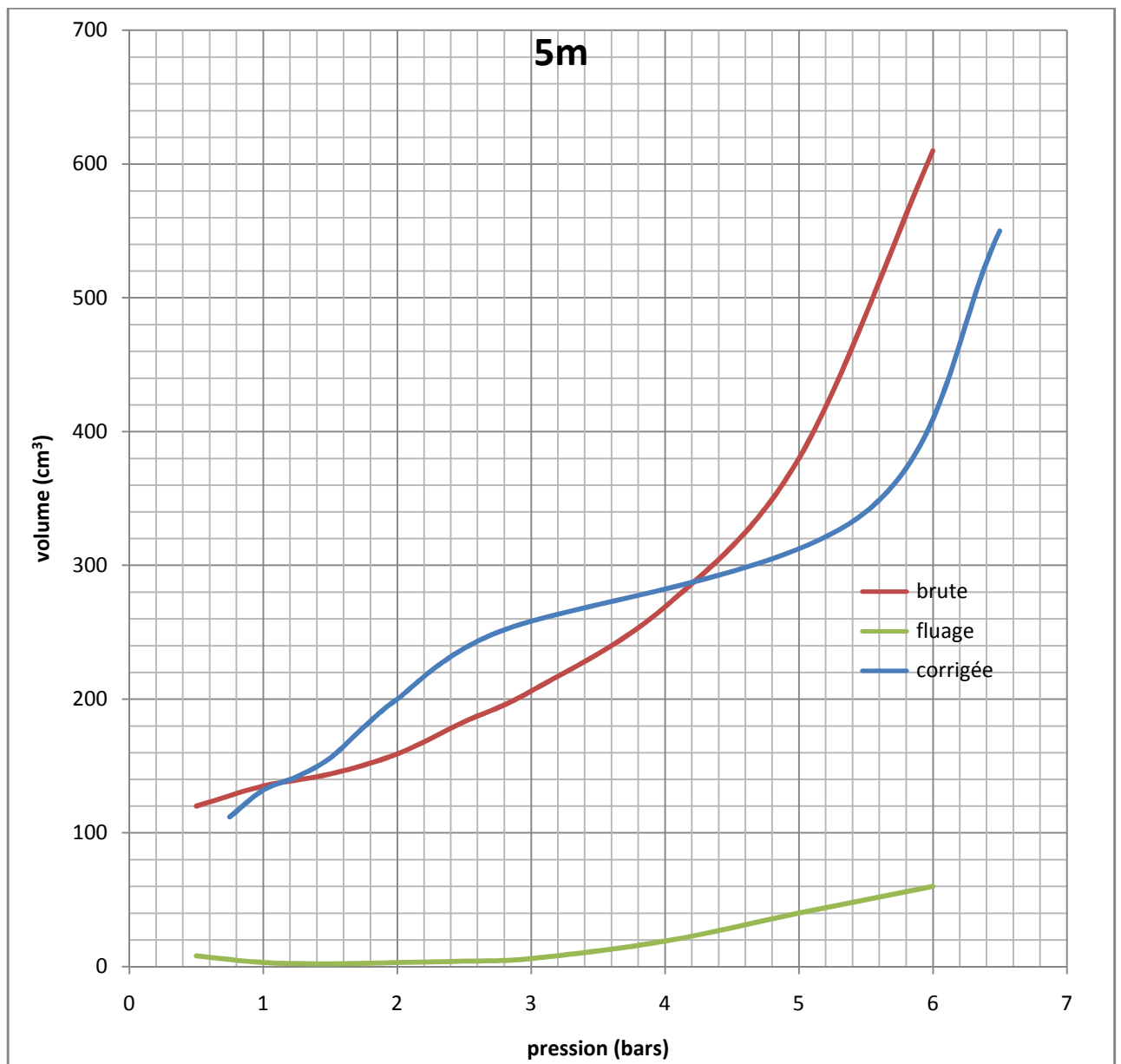


Figure IV.11 : la courbe brute et la courbe corrigée à 5m



Tableau IV.6 : Valeur de la pression et le volume à 6m

Pression (bar)	Volume (cm <sup>3</sup> )	$\Delta V$ (cm <sup>3</sup> )	Volume corrigé	Pression corrigée
0,5	92	12	80	0,85
1	164	15	149	1,1
1,5	246	26	220	1,35
2	320	32	288	1,6
2,5	481	40	441	1,85
3	600	49	551	2,1

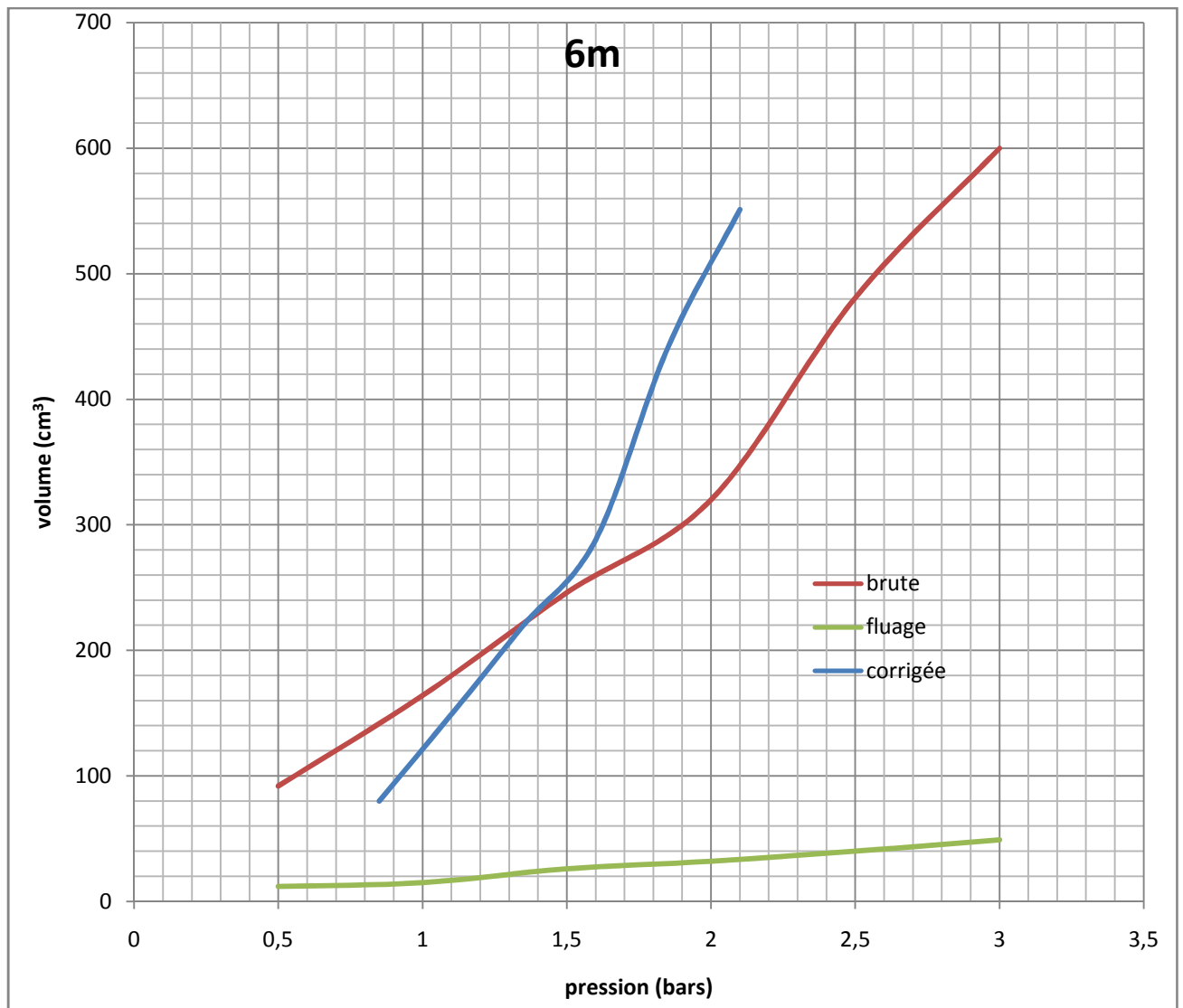


Figure IV.12 : la courbe brute et la courbe corrigée à 6m



Tableau IV.7 : Valeur de la pression et le volume à 8 m

Pression (bar)	Volume (cm <sup>3</sup> )	$\Delta V$ (cm <sup>3</sup> )	Volume corrigé	Pression corrigée
0,25	83	12	71	0,7
0,5	94	4	90	0,7
0,75	108	2	106	0,7
1	131	4	127	0,7
1,25	146	4	142	0,7
1,5	162	4	158	0,7
2	201	11	190	0,95
2,5	248	11	237	3,2
3	294	13	281	3,7
4	410	39	371	4,7
5	570	48	522	5,7

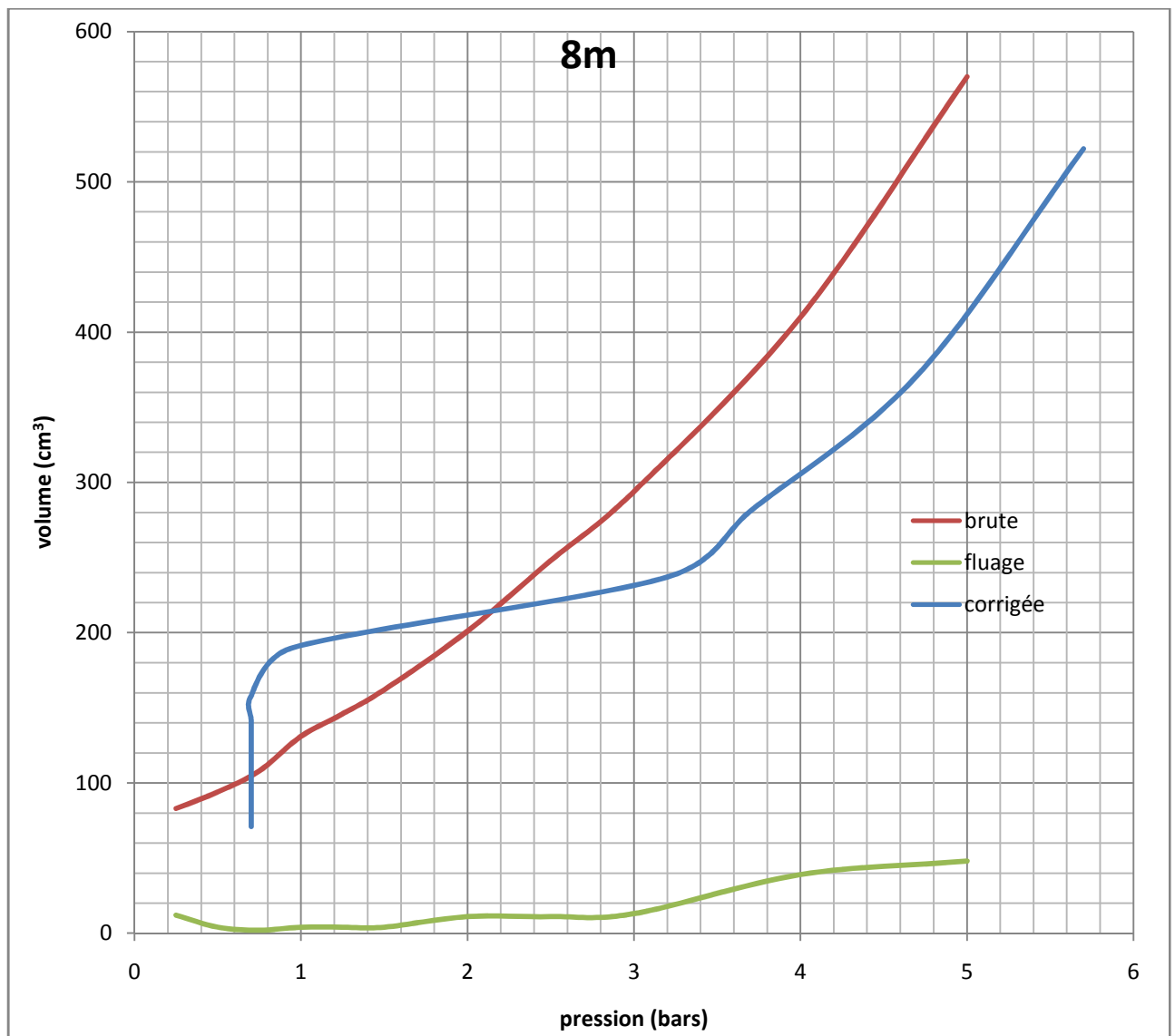


Figure IV.13 : la courbe brute et la courbe corrigée à 8m



Tableau IV.8 : Valeur de la pression et le volume à 9m

Pression (bar)	Volume (cm <sup>3</sup> )	$\Delta V$ (cm <sup>3</sup> )	Volume corrigé	Pression corrigée
0,5	110	8	102	1,15
1	150	8	142	1,4
1,5	180	10	170	1,65
2	216	10	206	1,9
2,5	240	7	233	2,15
3	269	7	262	2,4
4	302	10	292	3,15
5	356	13	343	5,9
6	438	26	412	6,9
7	570	39	531	7,9

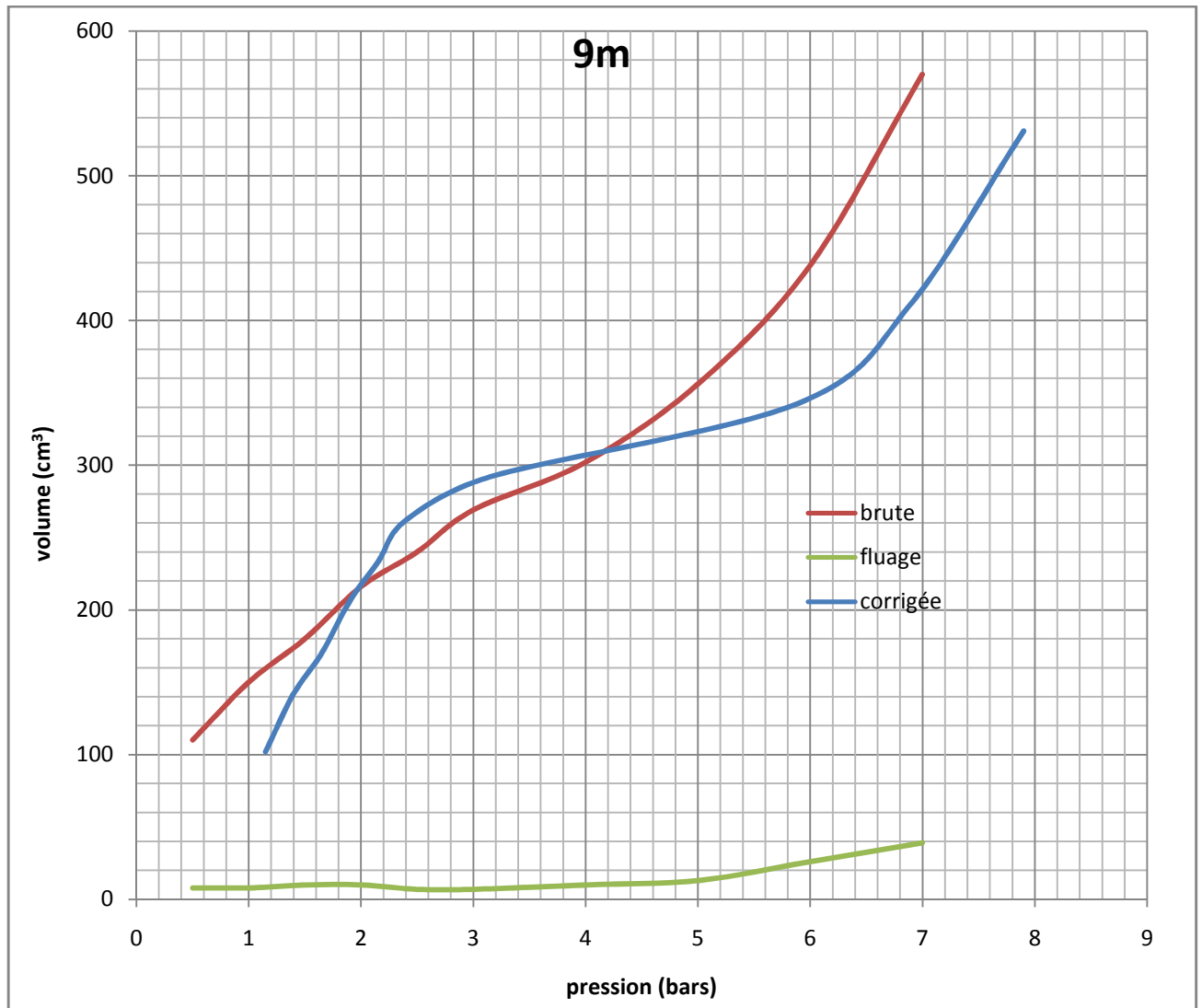


Figure IV.14 : la courbe brute et la courbe corrigée à 9m



Tableau IV.9 : Valeur de la pression et le volume à 10m

Pression (bar)	Volume (cm <sup>3</sup> )	$\Delta V$ (cm <sup>3</sup> )	Volume corrigé	Pression corrigée
0,5	119	9	110	1,25
1	133	3	130	1,5
1,5	141	1	140	1,75
2	147	1	146	2
2,5	153	1	152	2,25
3	160	1	159	2,5
4	172	1	171	3,25
5	184	1	183	6
6	196	5	191	7
8	246	7	239	9
10	312	19	293	11
12	438	28	410	13
14	600	50	550	15

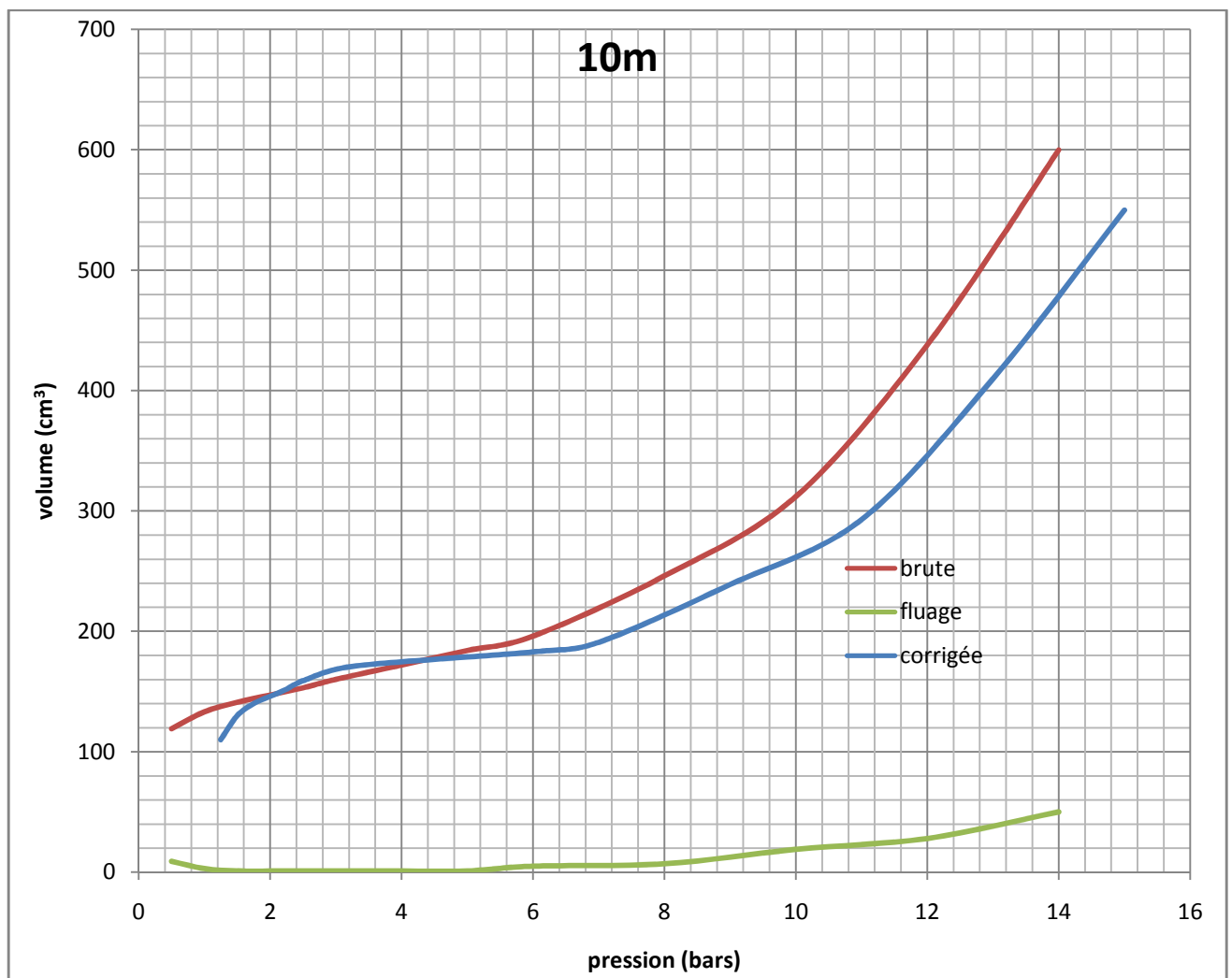


Figure IV.15 : la courbe brute et la courbe corrigée à 10m



Tableau IV.10 : Valeur de la pression et le volume à 11 m

Pression (bar)	Volume (cm <sup>3</sup> )	$\Delta V$ (cm <sup>3</sup> )	Volume corrigé	Pression corrigée
1	66	6	60	1,85
2	76	2	74	2,6
3	84	1	83	3,35
4	91	1	90	4,1
5	97	1	96	4,85
6	103	1	102	5,6
8	121	3	118	7,35
10	149	5	144	11,1
12	223	17	206	13,1
14	383	43	340	15,1
16	590	60	530	17,1

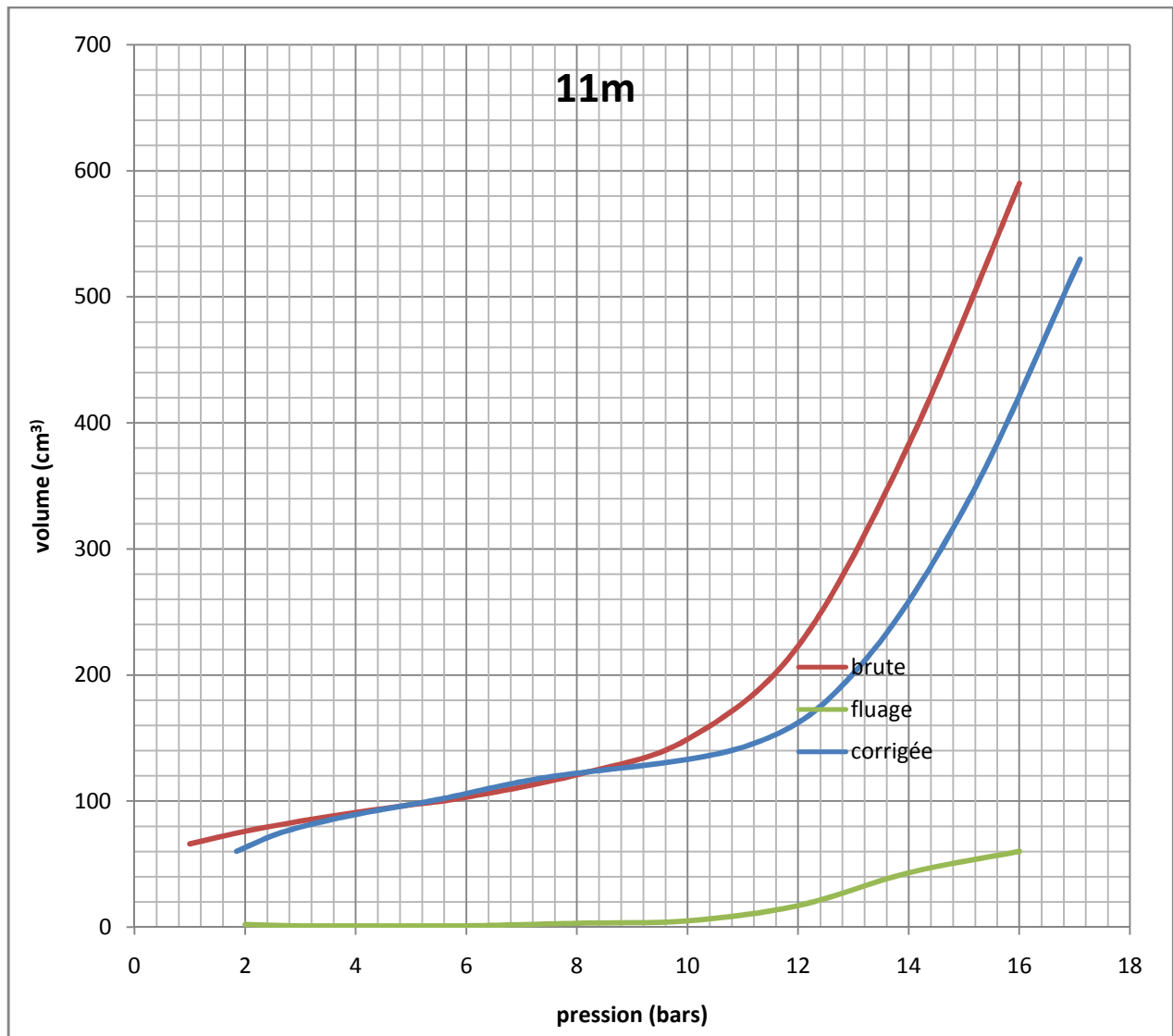


Figure IV.16 : la courbe brute et la courbe corrigée à 11m



IV.5.2.2 Sondage pressiométrique 2

Tableau IV.11 : Valeur de la pression et le volume à 2m

Pression (bar)	Volume (cm <sup>3</sup> )	$\Delta V$ (cm <sup>3</sup> )	Volume corrigé	Pression corrigée
0,5	164	9	155	0,45
1	118	3	115	0,7
1,5	140	3	137	0,95
2	160	5	155	1,2
2,5	198	2	196	1,45
3	216	6	210	1,7
4	315	15	300	2,45
5	540	85	455	5,2

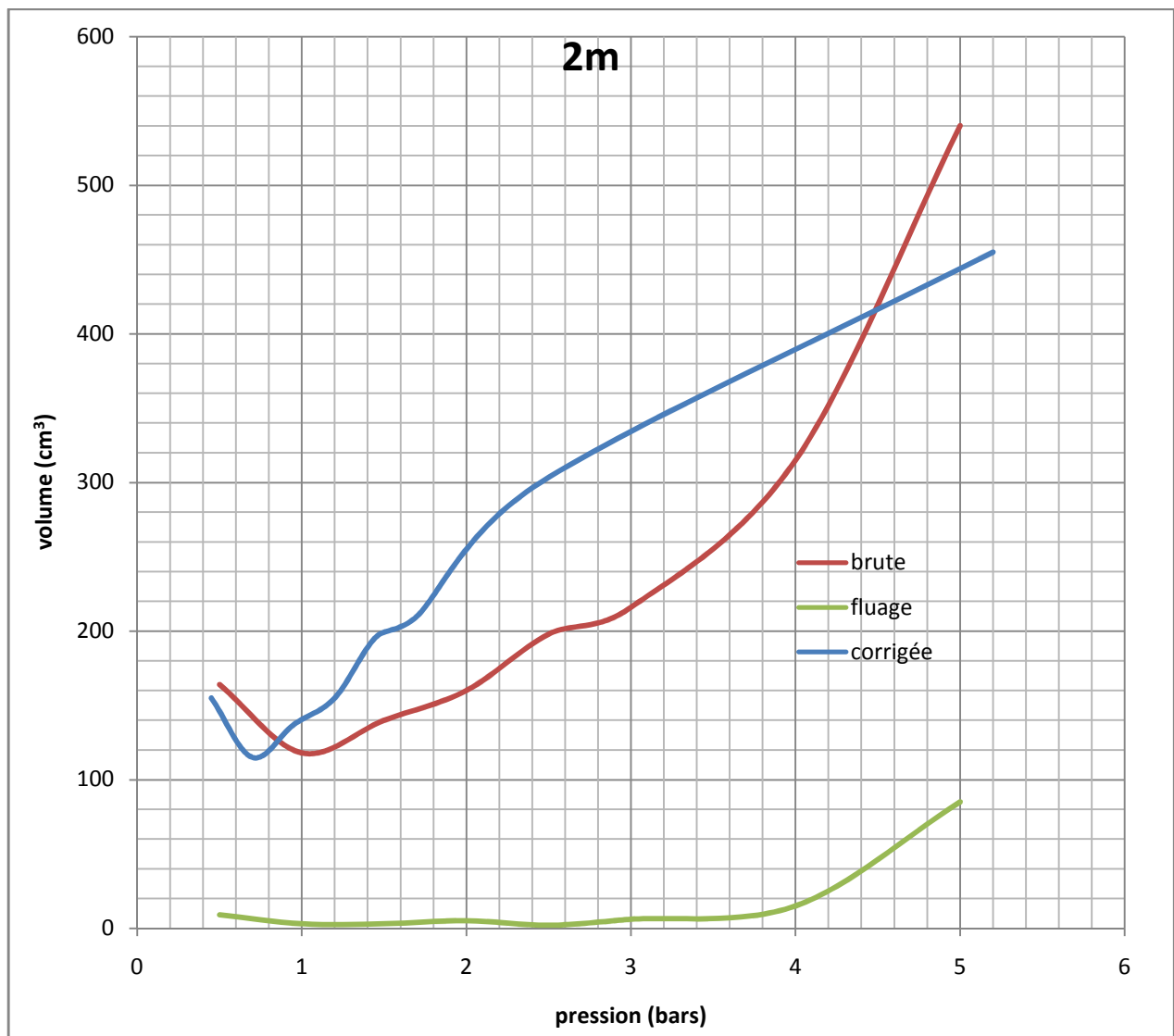


Figure IV.17 : la courbe brute et la courbe corrigée à 2m



Tableau IV.12 : Valeur de la pression et le volume à 3m

Pression (bar)	Volume (cm <sup>3</sup> )	$\Delta V$ (cm <sup>3</sup> )	Volume corrigé	Pression corrigée
0,5	98	8	90	0,55
1	117	3	114	0,8
1,5	131	3	128	1,05
2	148	2	146	1,3
2,5	164	2	162	1,55
3	184	3	181	1,8
4	223	6	217	2,55
5	301	23	278	5,3
6	450	47	403	6,3
7	662	59	603	7,3

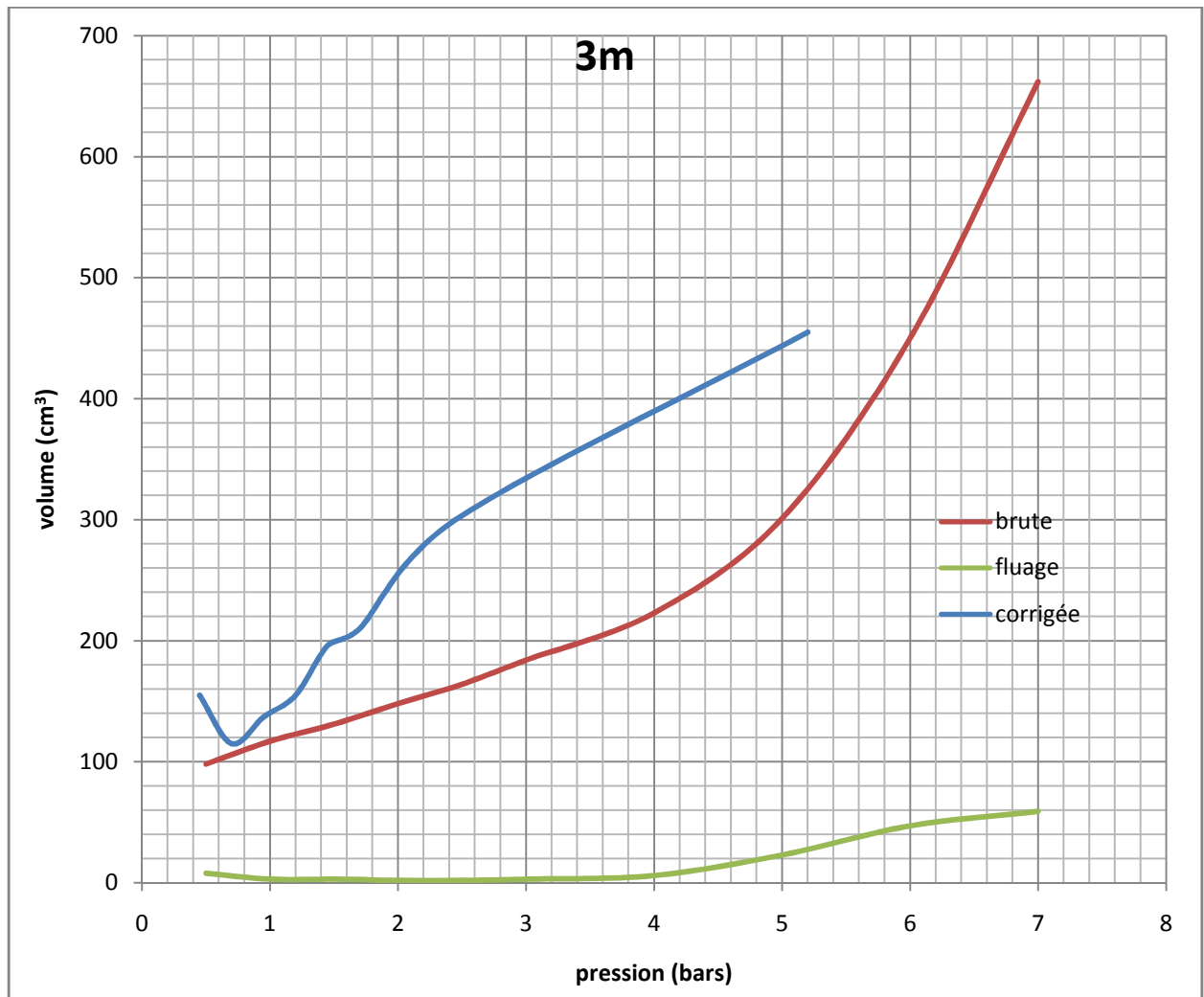


Figure IV.18 : la courbe brute et la courbe corrigée à 6m



Tableau IV.13 : Valeur de la pression et le volume à 4m

Pression (bar)	Volume (cm <sup>3</sup> )	$\Delta V$ (cm <sup>3</sup> )	Volume corrigé	Pression corrigée
0,5	110	4	108	0,65
1	122	2	120	0,9
1,5	138	2	134	1,15
2	156	4	153	1,4
2,5	179	3	174	1,65
3	205	5	186	1,9
4	266	19	218	2,65
5	379	48	319	5,4
6	600	60	600	6,4

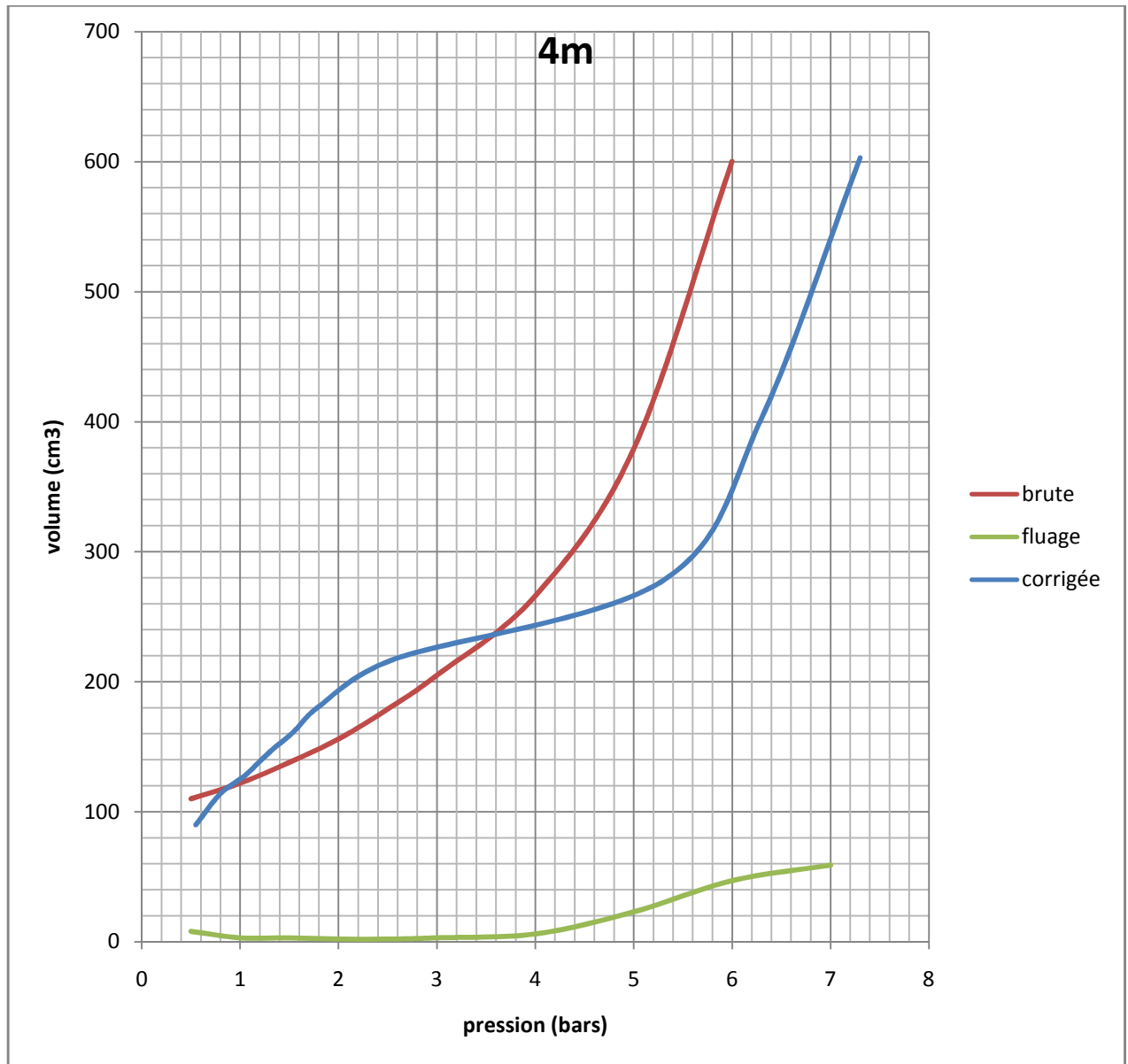


Figure IV.19 : la courbe brute et la courbe corrigée à 6m



Tableau IV.14 : Valeur de la pression et le volume à 5m

Pression (bar)	Volume (cm <sup>3</sup> )	$\Delta V$ (cm <sup>3</sup> )	Volume corrigé	Pression corrigée
0,5	16	16	0	0,75
1	171	21	150	1
1,5	200	4	196	1,25
2	235	5	230	1,5
2,5	264	5	259	1,75
3	284	2	282	2
4	350	19	331	2,75
5	500	40	460	5,5

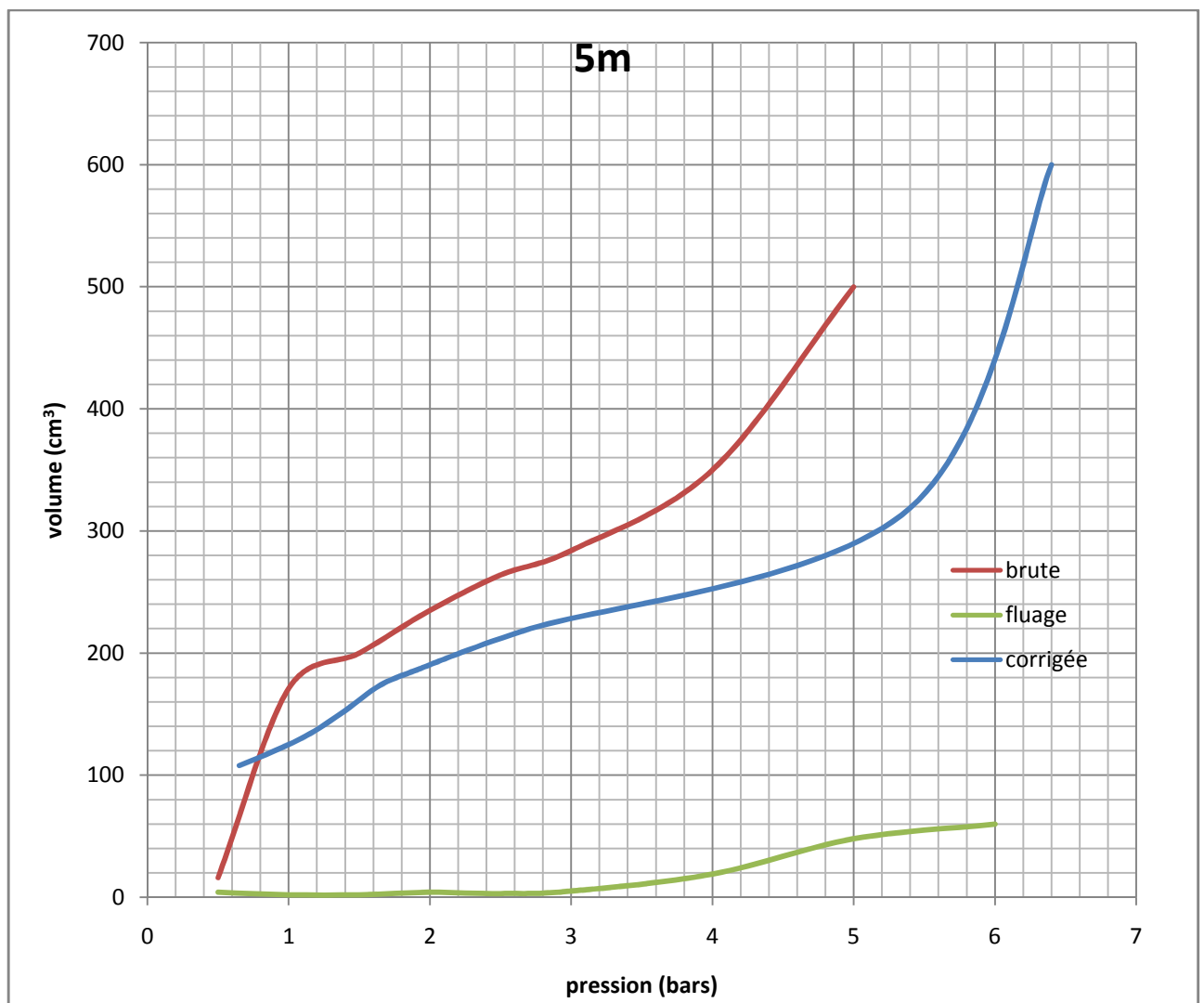


Figure IV.20 : la courbe brute et la courbe corrigée à 6m



Tableau IV.15 : Valeur de la pression et le volume à 6m

Pression (bar)	Volume (cm <sup>3</sup> )	$\Delta V$ (cm <sup>3</sup> )	Volume corrigé	Pression corrigée
0,25	123	11	112	0,6
0,5	170	9	161	0,6
0,75	219	11	208	0,6
1	258	15	243	0,6
1,25	282	4	278	0,6
1,5	303	7	296	0,6
2	350	10	340	0,85
2,5	389	11	378	3,1
3	431	11	420	3,6
3,5	492	12	480	4,1
4	560	17	543	4,6
5	664	33	631	5,6

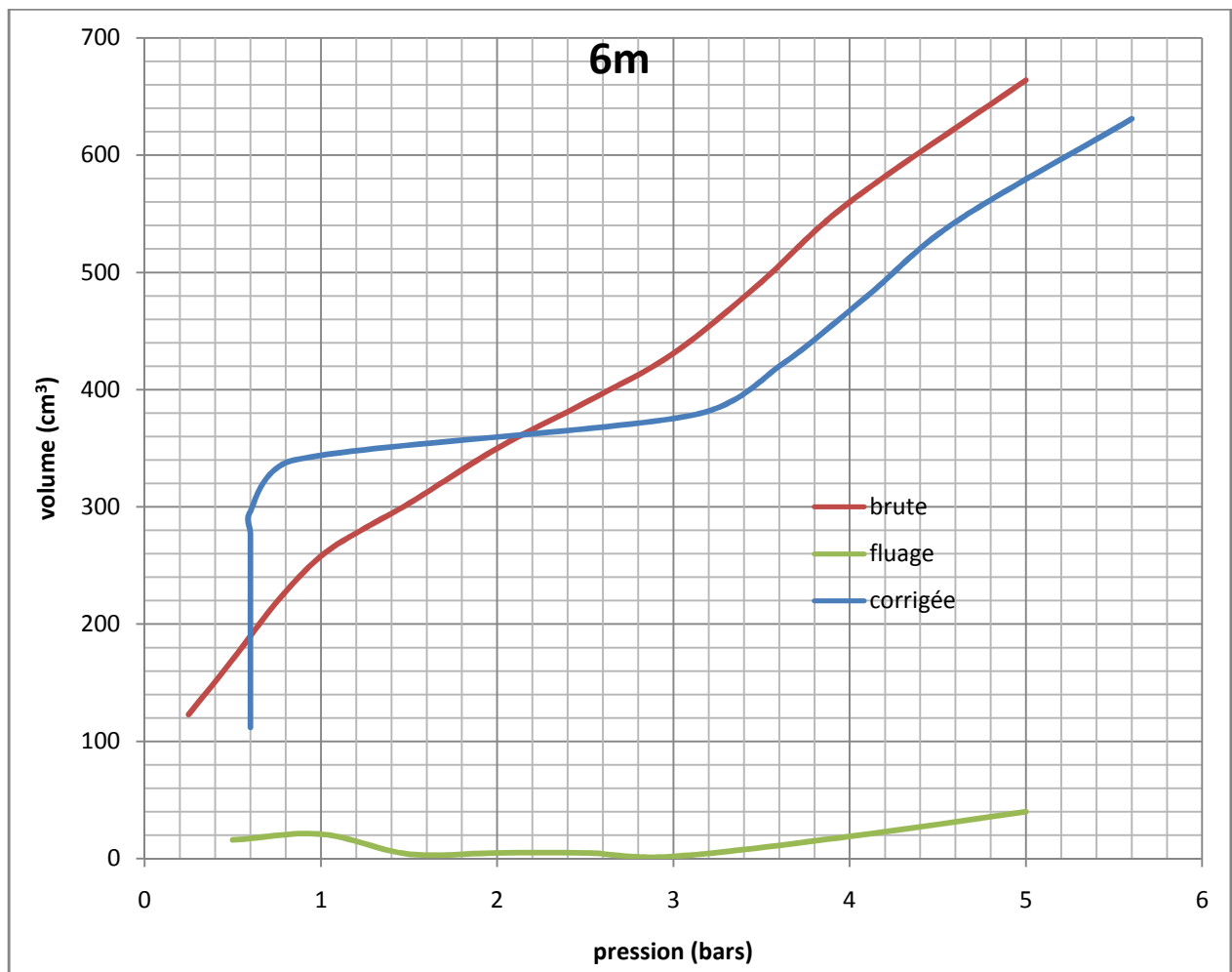
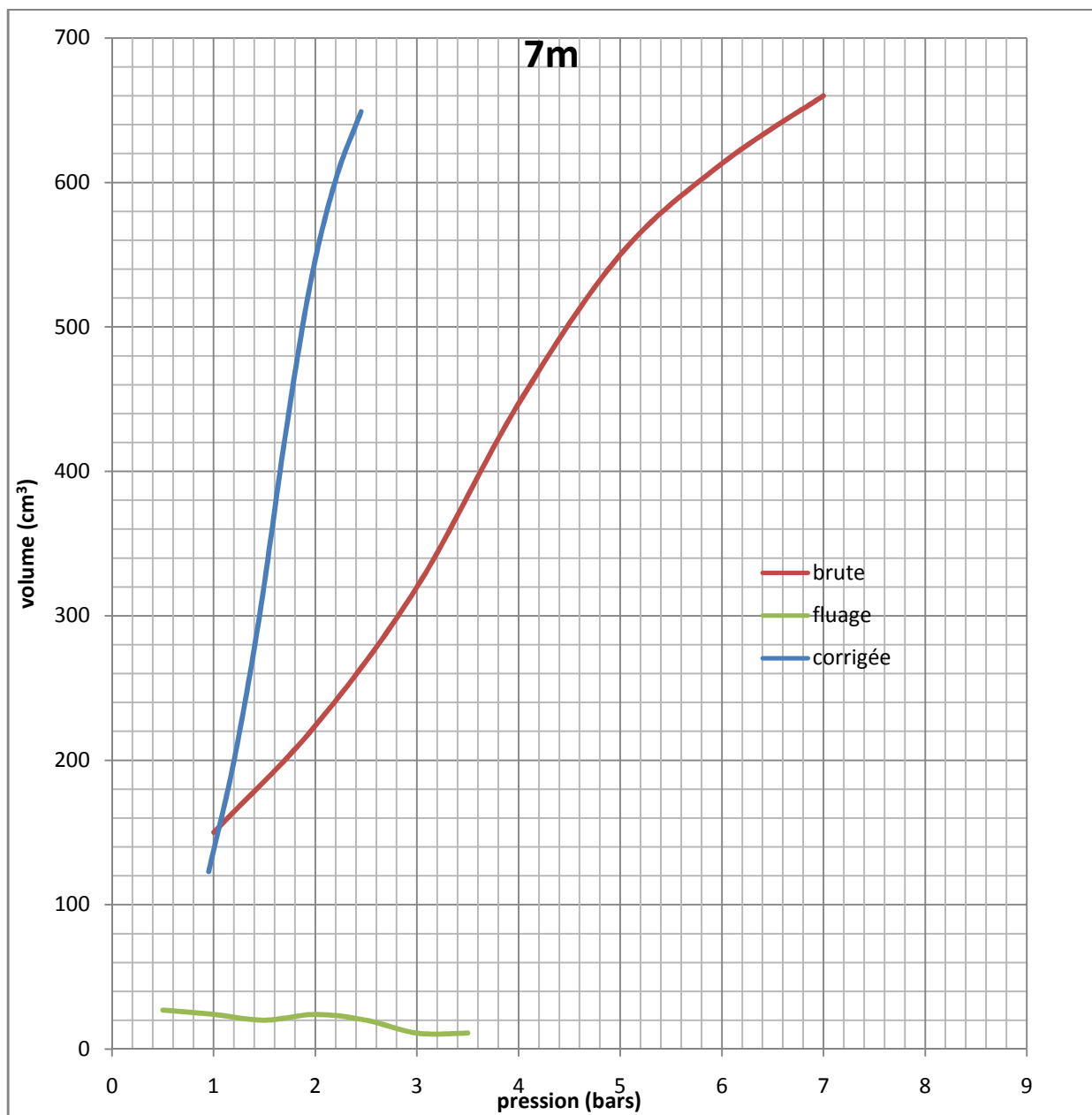




Figure IV.21 : la courbe brute et la courbe corrigée à 6m

Tableau IV.16: la courbe brute et la courbe corrigée à 6m

Pression (bar)	Volume (cm <sup>3</sup> )	$\Delta V$ (cm <sup>3</sup> )	Volume corrigé	Pression corrigée
0,5	150	27	123	0,95
1	224	24	200	1,2
1,5	320	20	300	1,45
2	447	24	423	1,7
2,5	550	20	530	1,95
3	613	11	602	2,2
3,5	660	11	649	2,45





**Figure IV.22 : la courbe brute et la courbe corrigée à 7m**

**Tableau IV.17 : Valeur de la pression et le volume à 8m**

<b>Pression (bar)</b>	<b>Volume (cm<sup>3</sup>)</b>	<b><math>\Delta V</math> (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Volume corrigé</b>
<b>0,5</b>	<b>140</b>	<b>25</b>	<b>1,05</b>
<b>1</b>	<b>213</b>	<b>13</b>	<b>1,3</b>
<b>1,5</b>	<b>243</b>	<b>5</b>	<b>1,55</b>
<b>2</b>	<b>260</b>	<b>4</b>	<b>1,8</b>
<b>2,5</b>	<b>282</b>	<b>3</b>	<b>2,05</b>
<b>3</b>	<b>301</b>	<b>4</b>	<b>2,3</b>
<b>3,5</b>	<b>326</b>	<b>5</b>	<b>2,55</b>
<b>4</b>	<b>350</b>	<b>6</b>	<b>4,8</b>
<b>5</b>	<b>452</b>	<b>26</b>	<b>5,8</b>
<b>6</b>	<b>610</b>	<b>41</b>	<b>6,8</b>

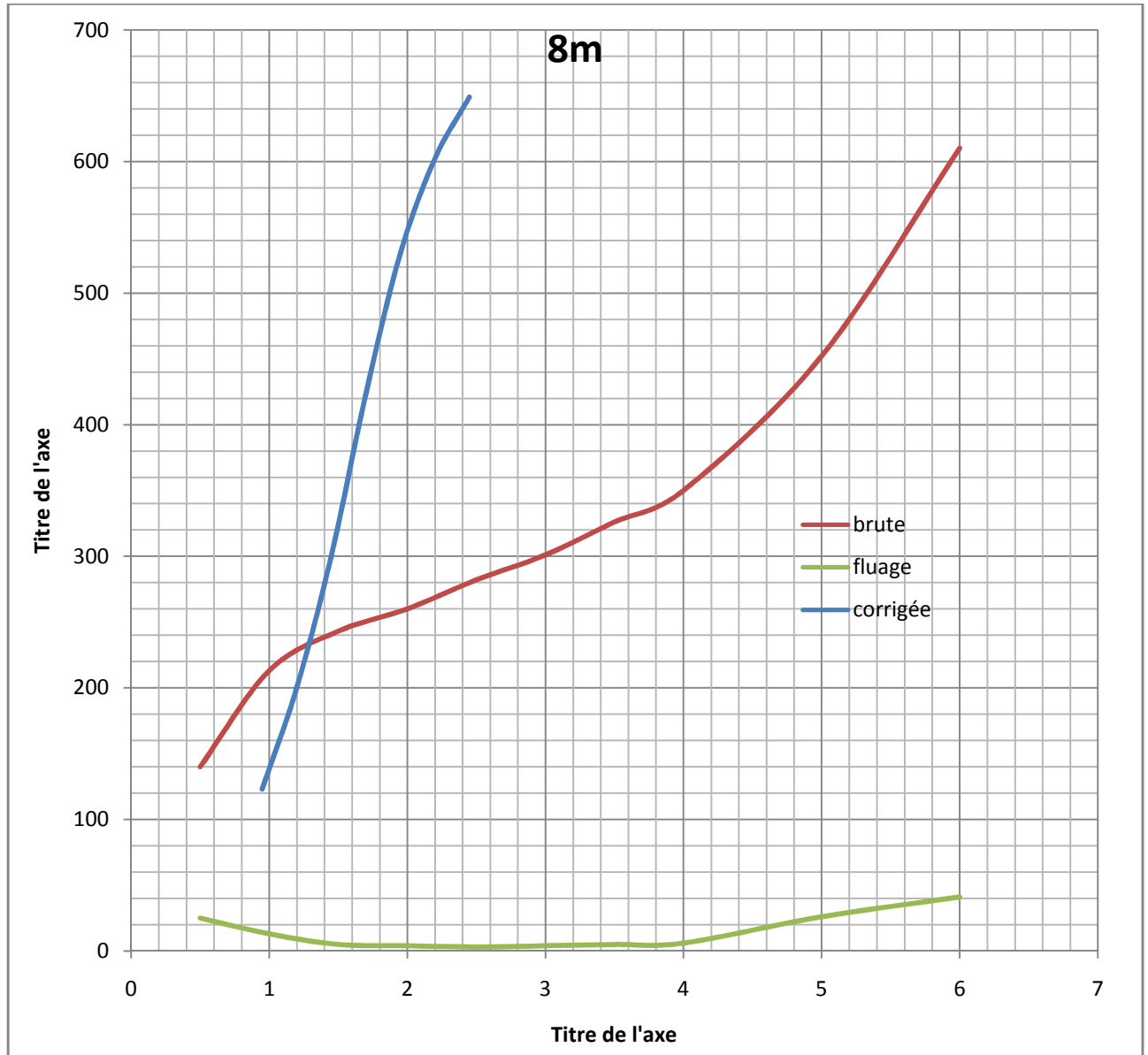


Figure IV.23 : la courbe brute et la courbe corrigée à 8m

Tableau IV.18 : Valeur de la pression et le volume à 10m

Pression (bar)	Volume (cm <sup>3</sup> )	$\Delta V$ (cm <sup>3</sup> )	Volume corrigé	Pression corrigée
0,5	96	6	90	1,25
1	116	3	113	1,5
1,5	125	3	122	1,75
2	132	1	131	2
2,5	137	1	136	2,25
3	143	1	142	2,5
4	156	2	154	3,25
5	167	2	165	6
7	189	3	186	8
9	217	5	212	10
11	294	22	272	12



13	400	29	371	14
15	581	47	534	16

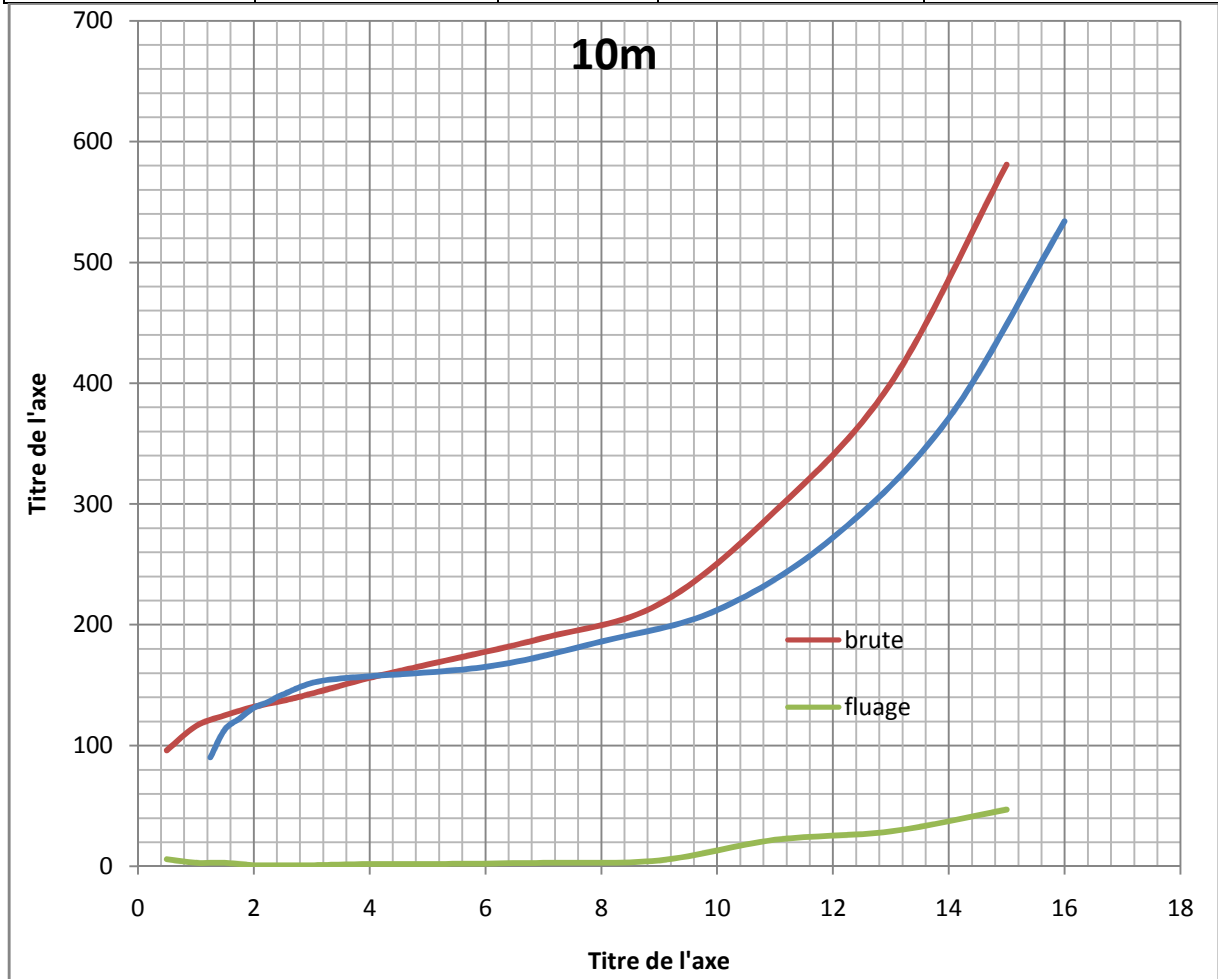


Figure IV.24 : la courbe brute et la courbe corrigée à 10m

Tableau IV.19 : Valeur de la pression et le volume à 11m

Pression (bar)	Volume (cm <sup>3</sup> )	$\Delta V$ (cm <sup>3</sup> )	Volume corrigé	Pression corrigée
1	96	4	92	1,85
2	124	4	120	2,6
3	143	3	140	3,35
4	159	3	156	4,1
5	174	3	171	4,85
6	188	2	186	5,6
8	223	5	218	7,35
10	266	14	252	11,1
12	367	27	340	13,1
14	520	50	470	15,1

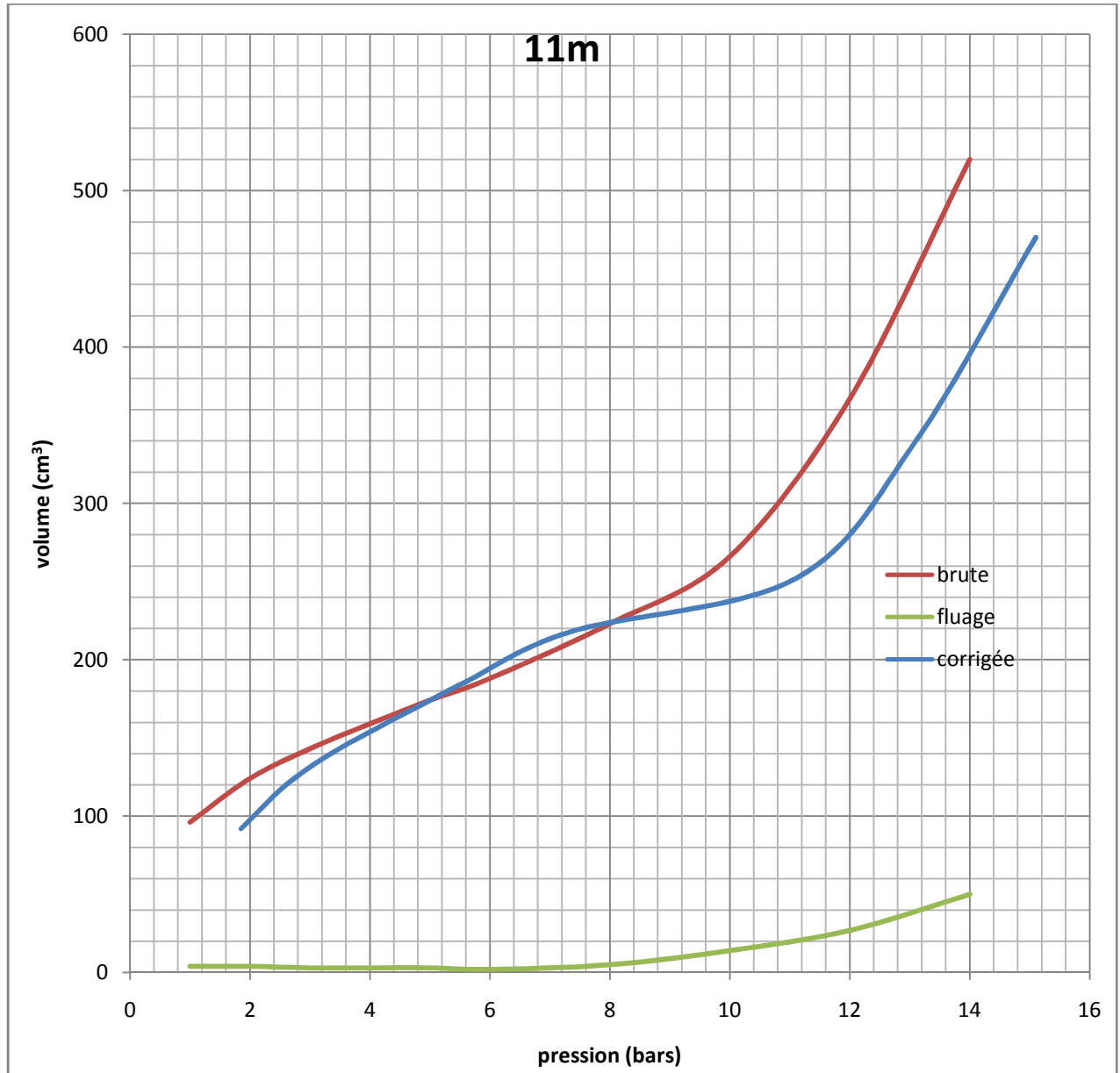


Figure IV.25 : la courbe brute et la courbe corrigée à 11m

Tableau IV.20 : Valeur de la pression et le volume à 12m

Pression (bar)	Volume (cm <sup>3</sup> )	$\Delta V$ (cm <sup>3</sup> )	Volume corrigé	Pression corrigée
1	104	4	100	1,95
2	126	4	122	2,7
3	146	3	143	3,45
4	164	4	160	4,2
5	180	4	176	4,95
6	194	2	192	5,7
8	226	6	220	7,45
10	260	10	250	11,2
12	370	35	335	13,2
14	530	38	492	15,2

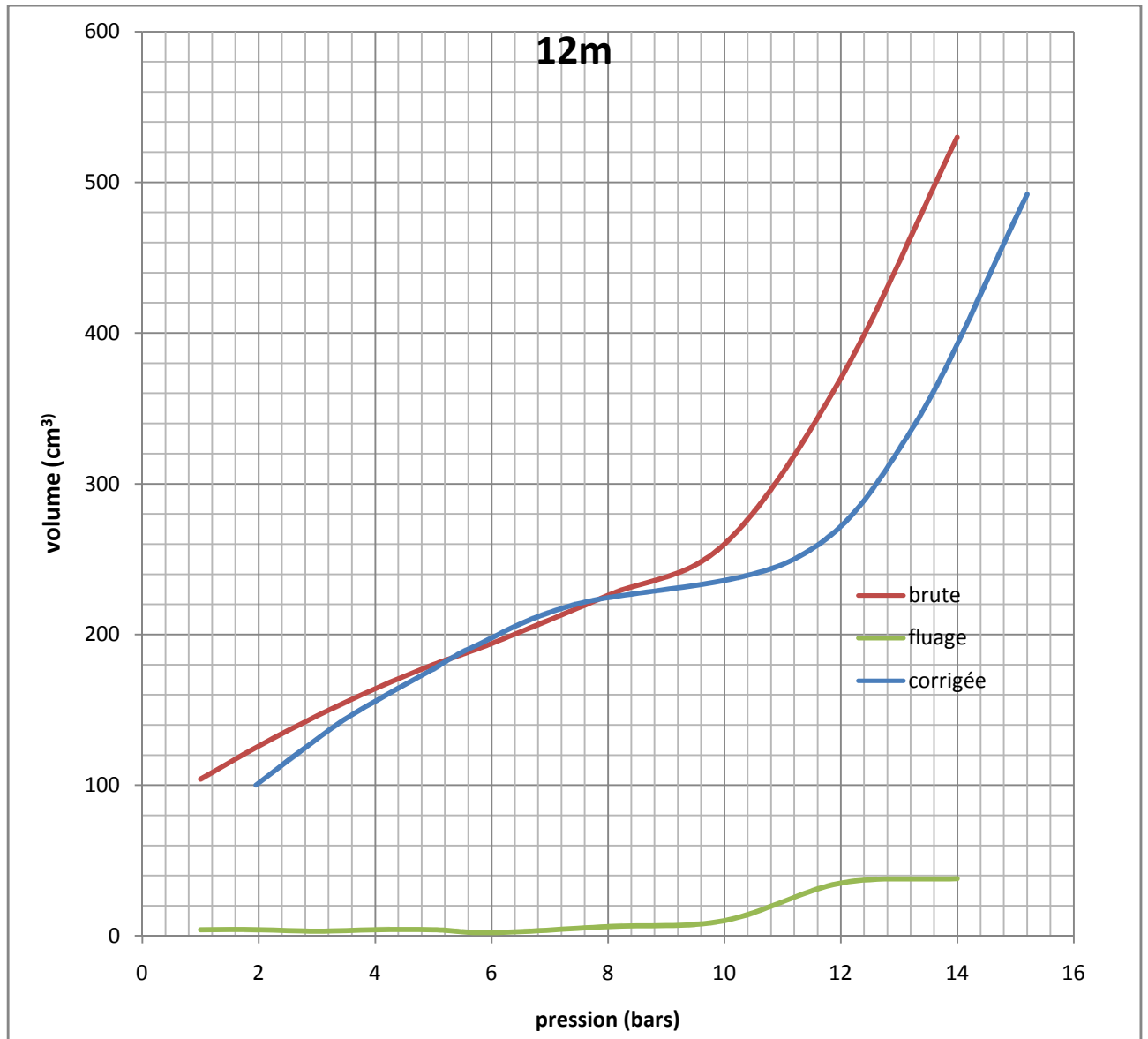


Figure IV.26 : la courbe brute et la courbe corrigée à 12m

IV.5.2.3 Sondage pressiométrique 3

Tableau IV.21 : Valeur de la pression et le volume à 2m

Pression (bar)	Volume (cm <sup>3</sup> )	$\Delta V$ (cm <sup>3</sup> )	Volume corrigé	Pression corrigée
0,5	122	16	106	0,45
1	196	16	180	0,7
1,5	242	13	229	0,95
2	280	9	271	1,2
2,5	315	11	304	1,45
3	384	24	360	1,7
3,5	450	30	420	1,95



4	641	41	600	4,2
---	-----	----	-----	-----

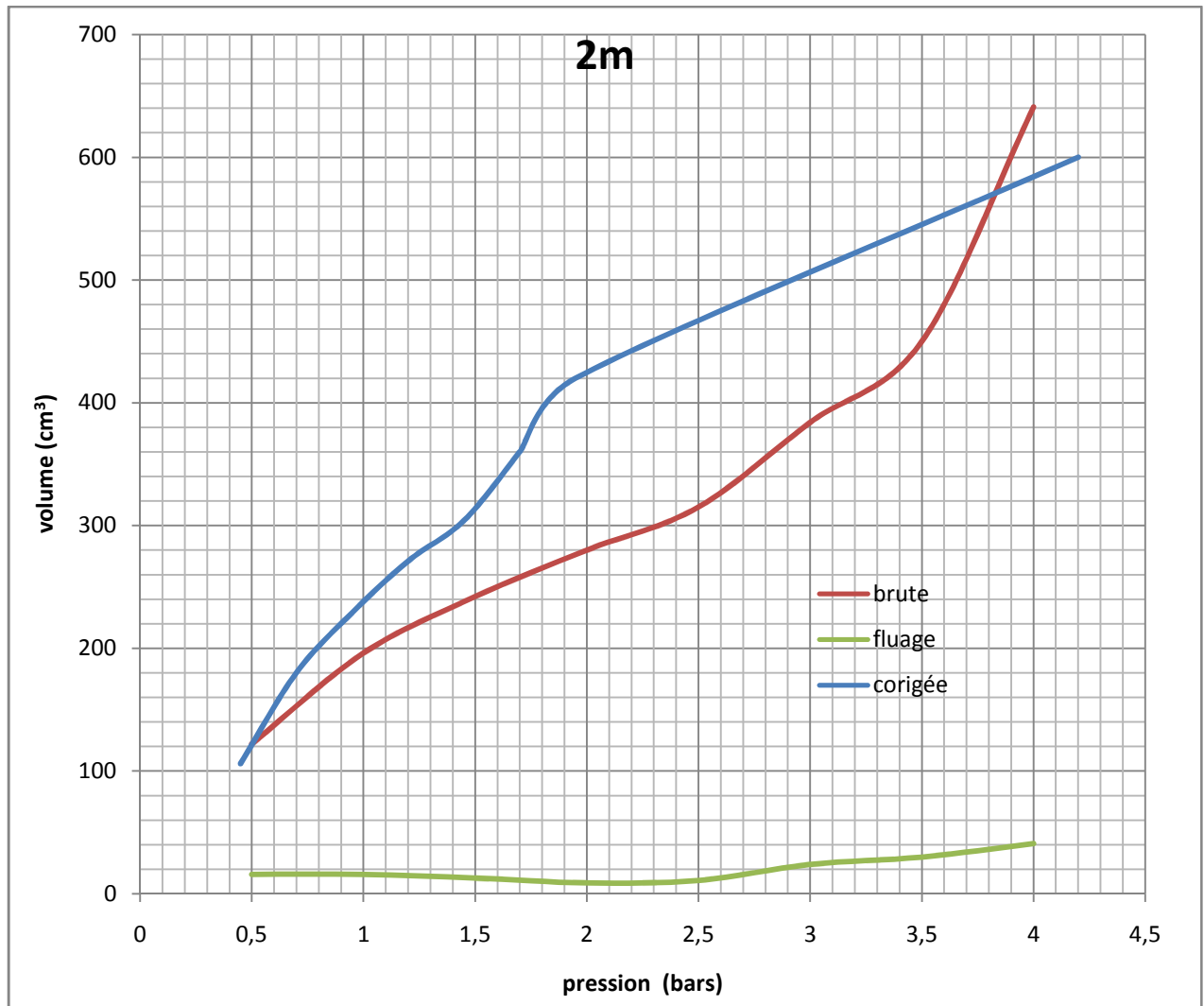


Figure IV.27 : la courbe brute et la courbe corrigée à 2m

Tableau IV.22 : Valeur de la pression et le volume à 3m

Pression (bar)	Volume (cm <sup>3</sup> )	$\Delta V$ (cm <sup>3</sup> )	Volume corrigé	Pression corrigée
0,5	112	16	96	0,55
1	136	6	130	0,8
1,5	148	2	146	1,05
2	164	2	162	1,3
2,5	179	3	176	1,55
3	200	4	196	1,8
4	232	5	227	2,55
5	290	11	279	5,3



# CHAPITRE IV

## ANALYSE PRESSIOMETRIQUE

6	386	26	360	6,3
7	542	51	491	7,3

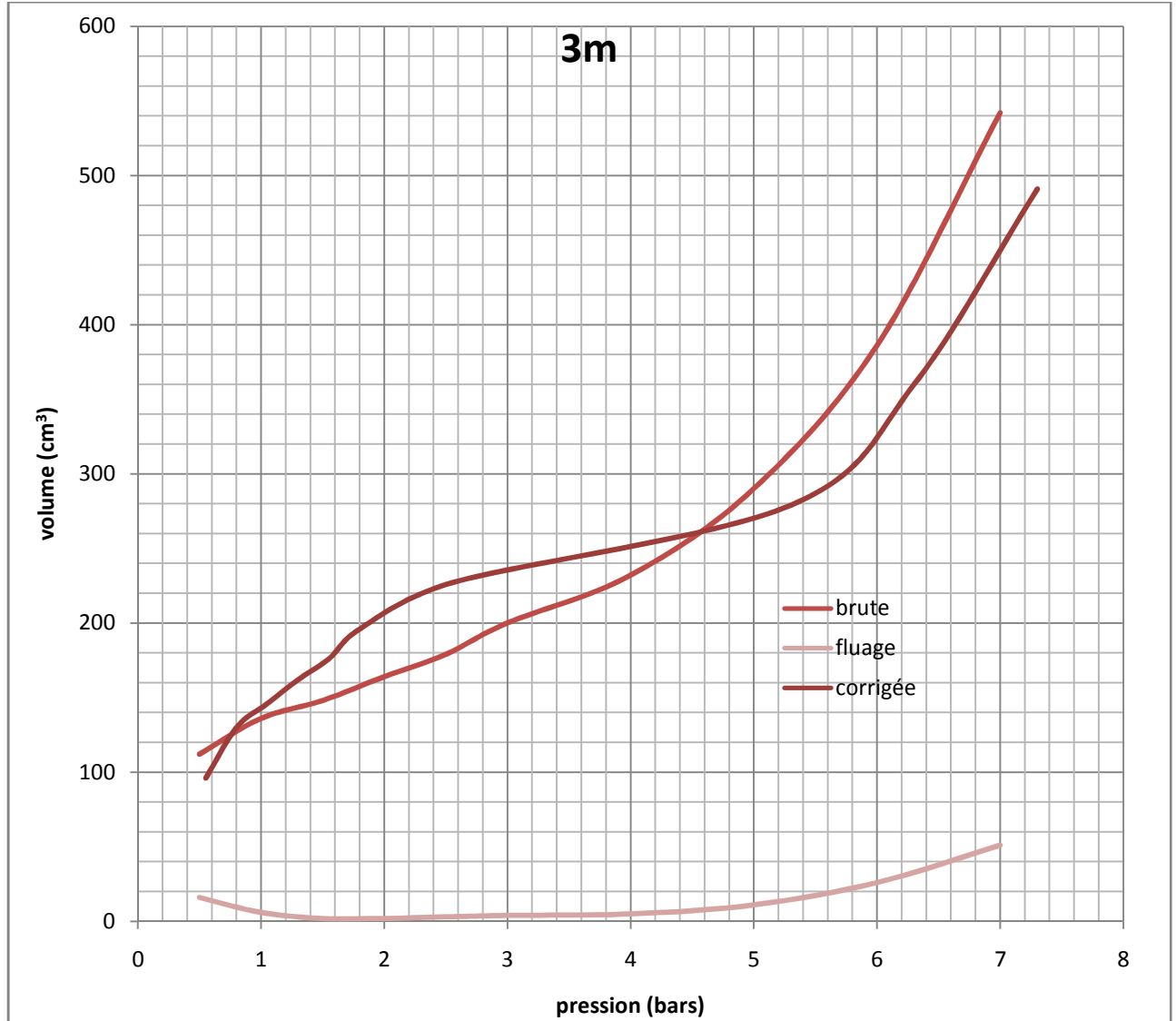


Figure IV.28 : la courbe brute et la courbe corrigée à 3m

Tableau IV.23 : Valeur de la pression et le volume à 4m

Pression (bar)	Volume (cm <sup>3</sup> )	$\Delta V$ (cm <sup>3</sup> )	Volume corrigé	Pression corrigée
0,5	132	30	102	0,65
1	190	9	181	0,9
1,5	222	5	217	1,15
2	246	5	241	1,4
2,5	272	4	268	1,65
3	305	5	300	1,9
3,5	338	6	332	2,15



## CHAPITRE IV

### ANALYSE PRESSIOMETRIQUE

4	380	8	372	4,4
5	470	16	454	5,4
6	600	36	564	6,4

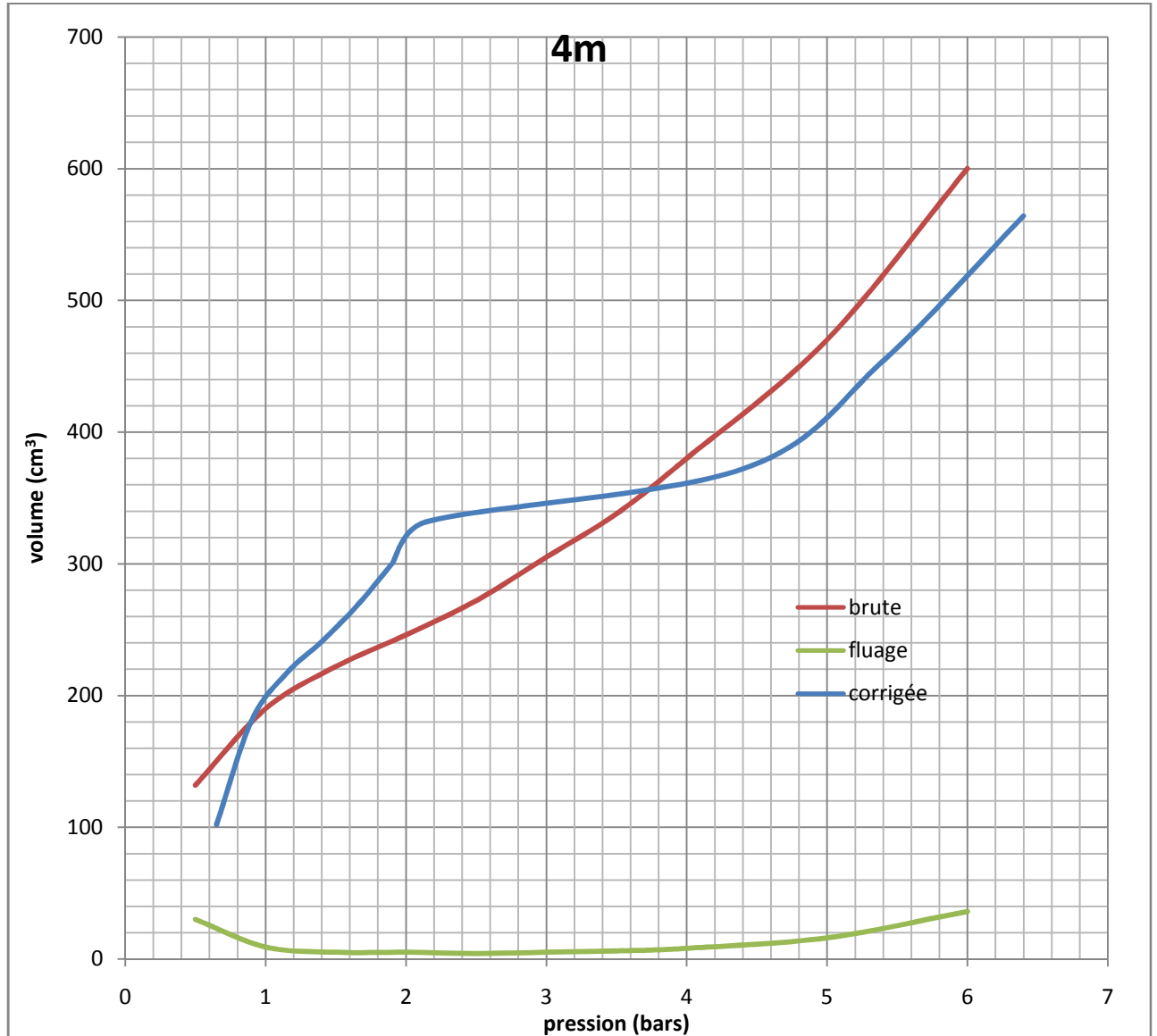


Figure IV.29 : la courbe brute et la courbe corrigée à 4m

Tableau IV.24 : Valeur de la pression et le volume à 5m

Pression (bar)	Volume (cm <sup>3</sup> )	$\Delta V$ (cm <sup>3</sup> )	Volume corrigé	Pression corrigée
0,5	126	24	102	0,75
1	149	3	146	1
1,5	164	6	158	1,25
2	191	3	188	1,5
2,5	225	5	220	1,75
3	260	6	254	2
4	328	22	306	2,75
5	420	29	391	5,5



6	560	40	520	6,5
---	-----	----	-----	-----

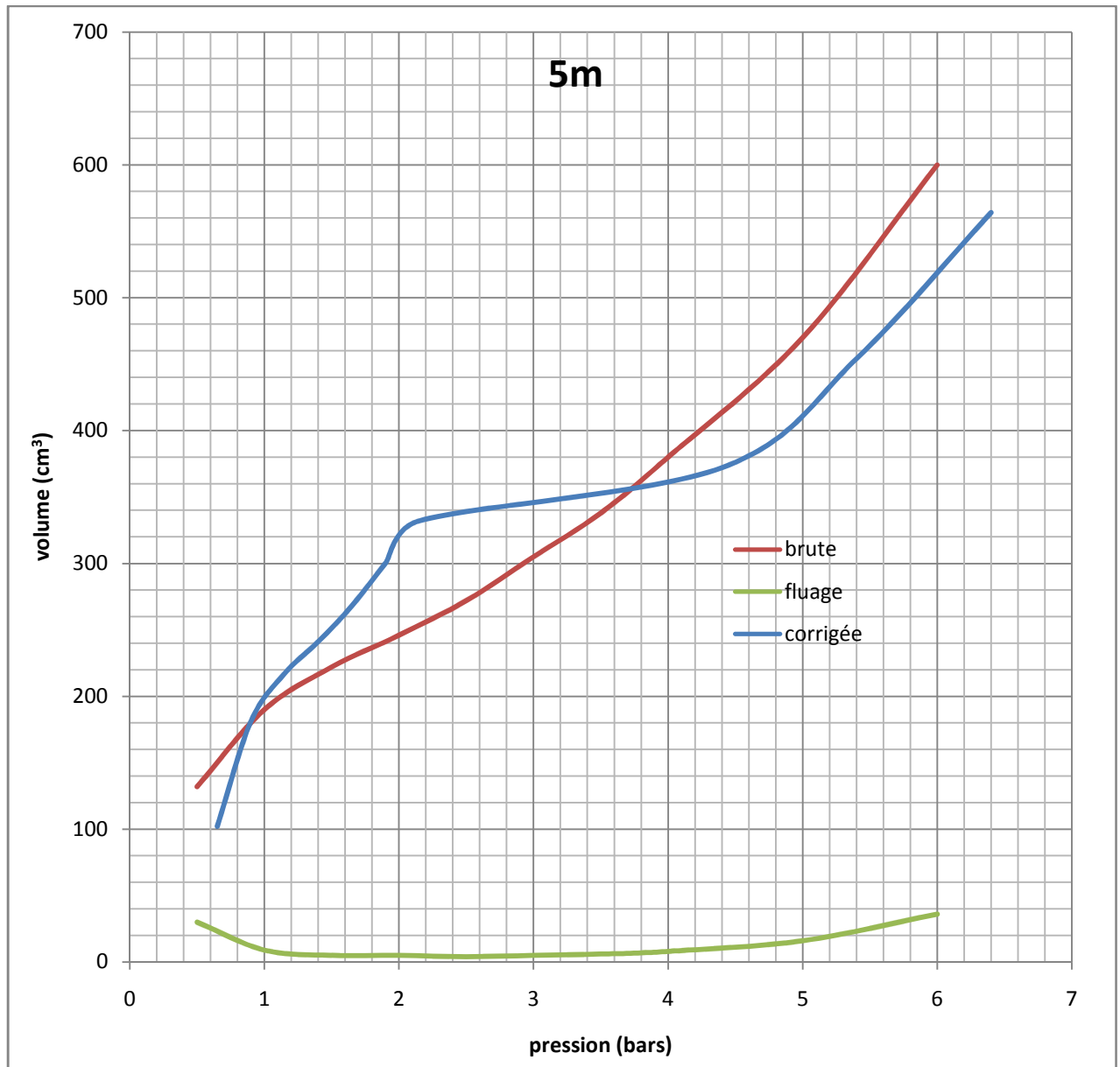


Figure IV.30 : la courbe brute et la courbe corrigée à 5m

Tableau IV.25 : Valeur de la pression et le volume à 6m

Pression (bar)	Volume (cm <sup>3</sup> )	$\Delta V$ (cm <sup>3</sup> )	Volume corrigé	Pression corrigée
0,5	123	18	105	0,75
1	140	8	132	1
1,5	154	3	151	1,25
2	172	4	168	1,5
2,5	200	4	196	1,75
3	219	3	216	2
4	263	7	256	2,75



5	342	22	320	5,5
6	460	36	424	6,5
7	628	48	580	7,5

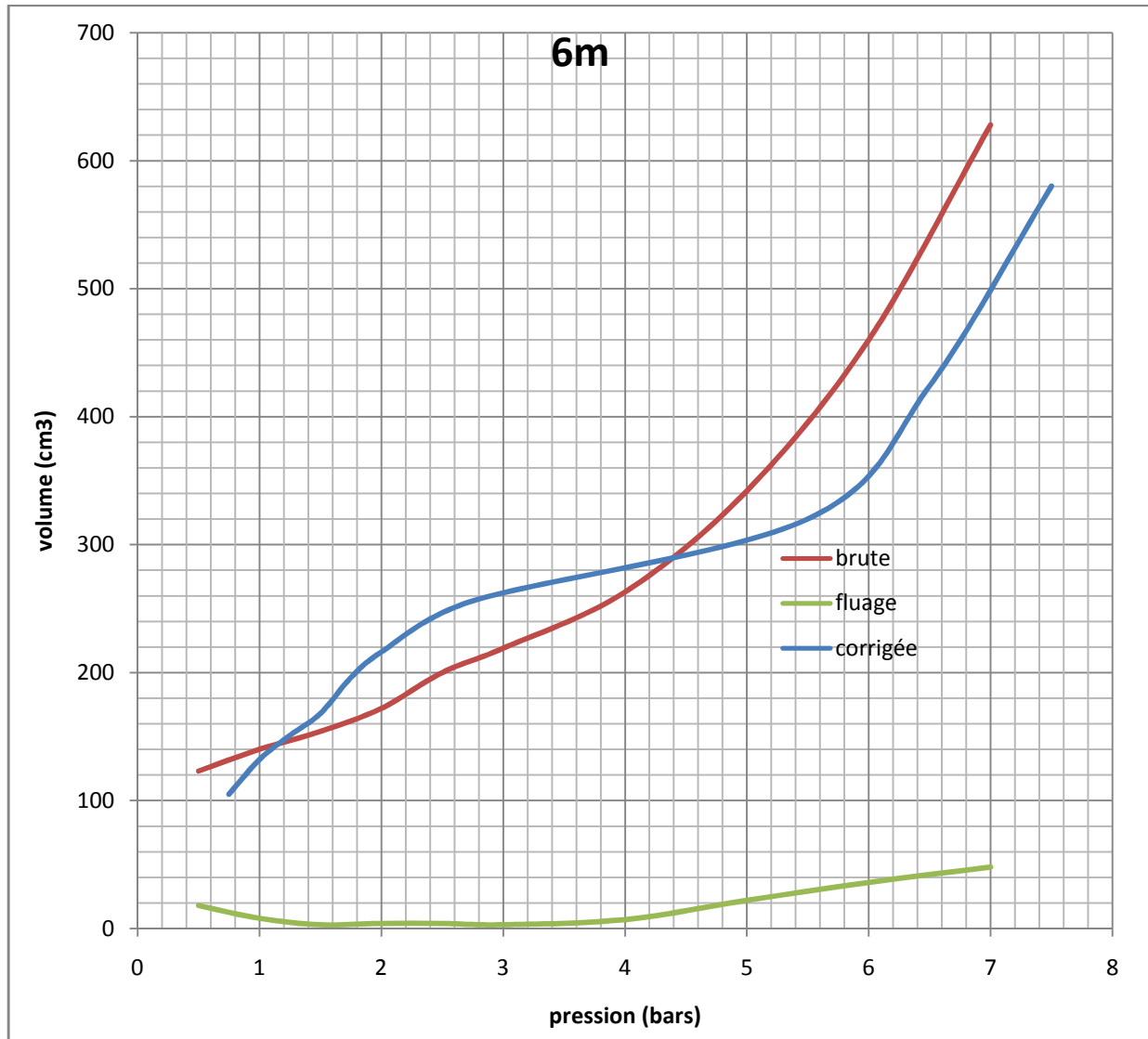


Figure IV.31 : la courbe brute et la courbe corrigée à 6m

Tableau IV.26 : Valeur de la pression et le volume à 7m

Pression (bar)	Volume (cm <sup>3</sup> )	$\Delta V$ (cm <sup>3</sup> )	Volume corrigé	Pression corrigée
0,5	126	16	110	0,95
1	142	8	134	1,2
1,5	158	5	153	1,45
2	174	4	170	1,7
3	205	5	200	2,45
4	260	10	250	3,2



## CHAPITRE IV

### ANALYSE PRESSIOMETRIQUE

5	343	21	322	3,95
6	449	32	417	6,7
7	610	49	561	7,7

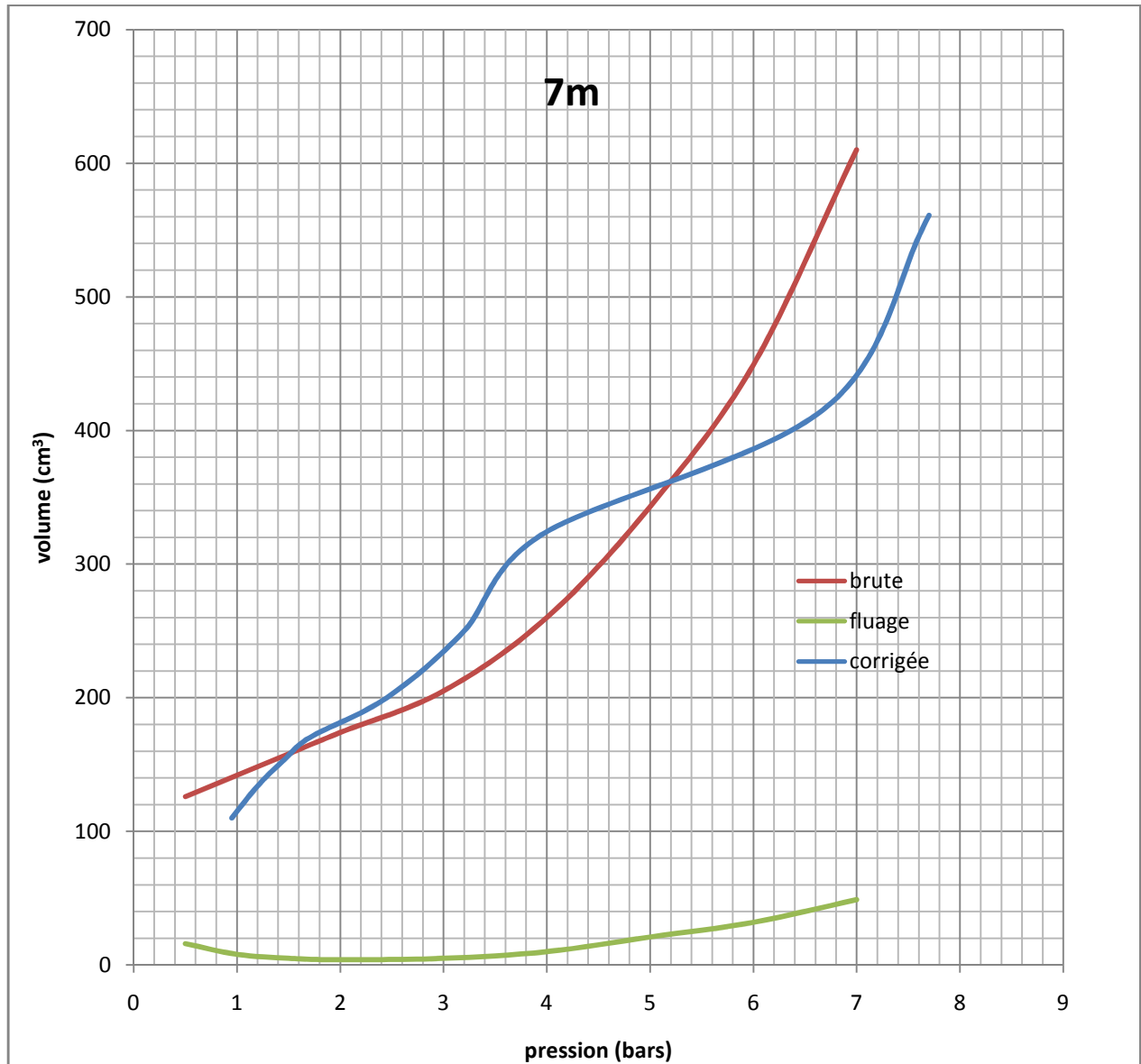


Figure IV.32 : la courbe brute et la courbe corrigée à 7m

Tableau IV.27 : Valeur de la pression et le volume à 8m

Pression (bar)	Volume (cm <sup>3</sup> )	$\Delta V$ (cm <sup>3</sup> )	Volume corrigé	Pression corrigée
0,5	138	35	103	1,05
1	200	17	183	1,3
1,5	263	20	243	1,55
2	333	23	310	1,8
2,5	427	27	400	2,05
3	522	28	494	2,3



3,5	648	35	613	2,55
-----	-----	----	-----	------

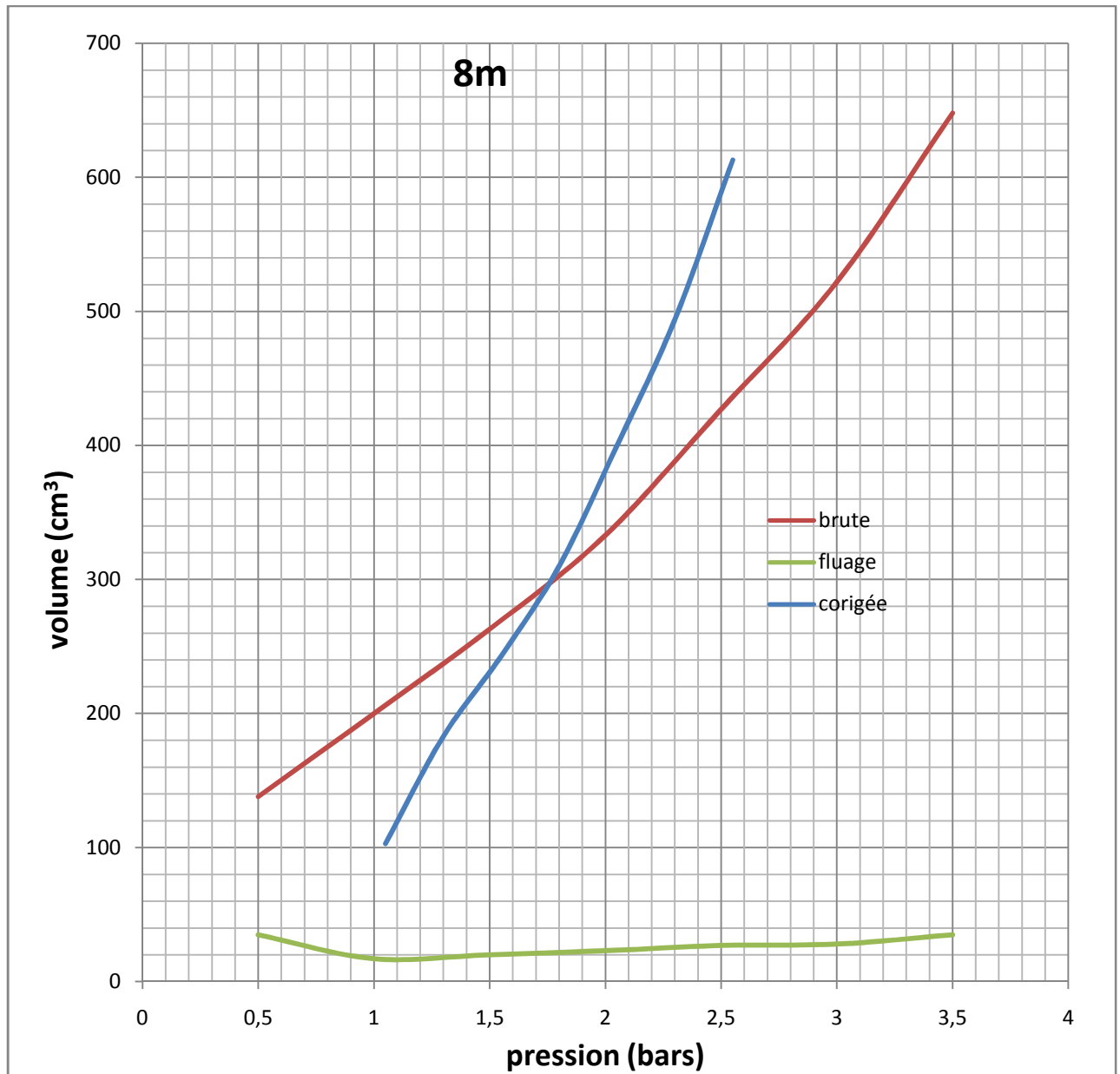


Figure IV.33 : la courbe brute et la courbe corrigée à 6m

Tableau IV.28 : Valeur de la pression et le volume à 9m

Pression (bar)	Volume (cm <sup>3</sup> )	$\Delta V$ (cm <sup>3</sup> )	Volume corrigé	Pression corrigée
0,5	142	26	116	1,15
1	214	18	196	1,4
1,5	306	26	280	1,65
2	400	26	374	1,9
2,5	490	17	473	2,15
3	542	11	531	2,4



3,5	620	28	592	2,65
4	700	17	683	4,9

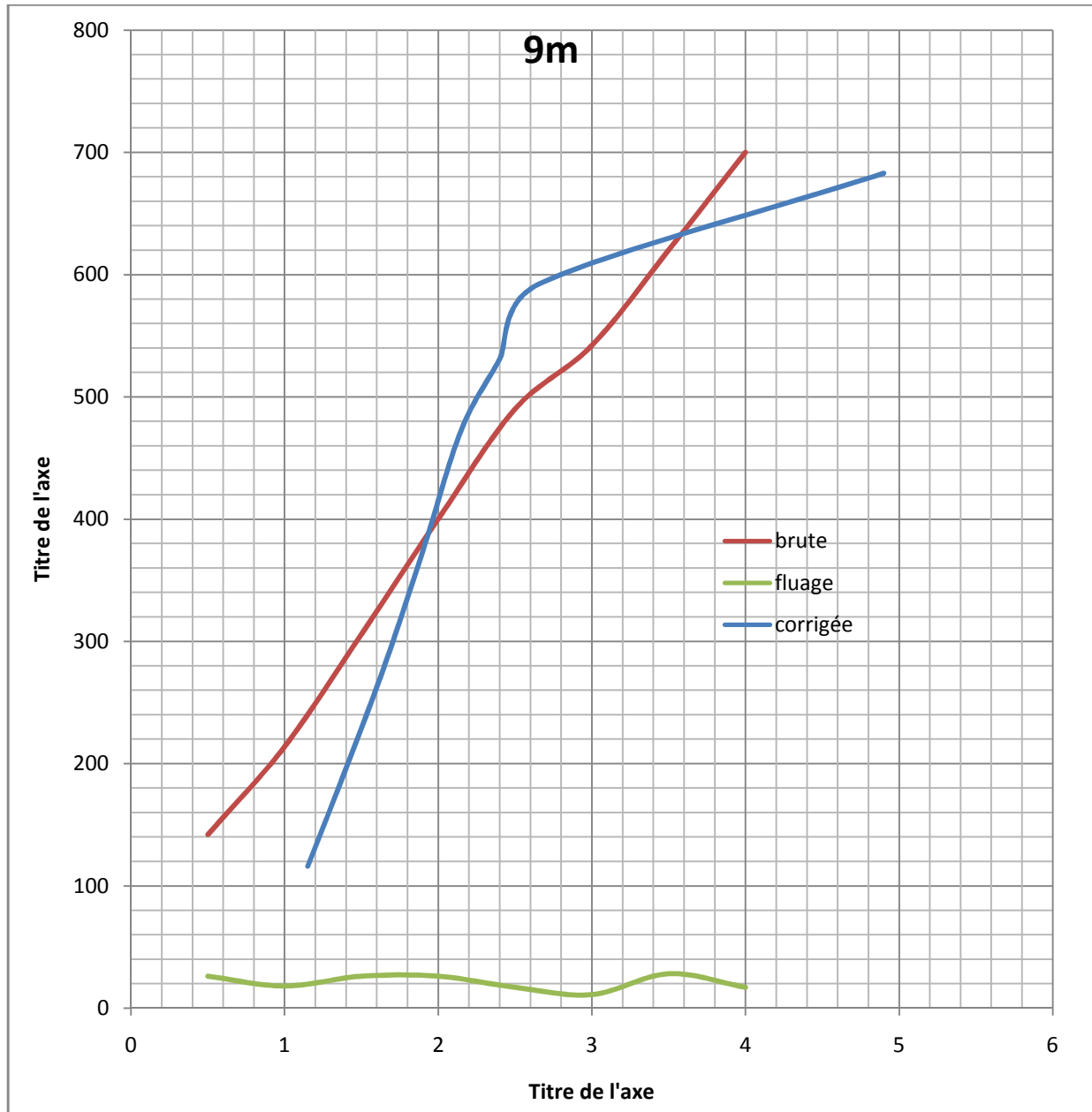


Figure IV.34 : la courbe brute et la courbe corrigée à 9m

Tableau IV.29 : Valeur de la pression et le volume à 10m

Pression (bar)	Volume (cm <sup>3</sup> )	$\Delta V$ (cm <sup>3</sup> )	Volume corrigé	Pression corrigée
0,5	132	34	98	1,25
1	163	7	156	1,5
1,5	184	4	180	1,75
2	209	5	204	2
2,5	234	5	229	2,25



## CHAPITRE IV

### ANALYSE PRESSIOMETRIQUE

3	258	5	253	2,5
4	300	9	291	3,25
5	348	10	338	6
6	420	14	406	7
7	560	41	519	8

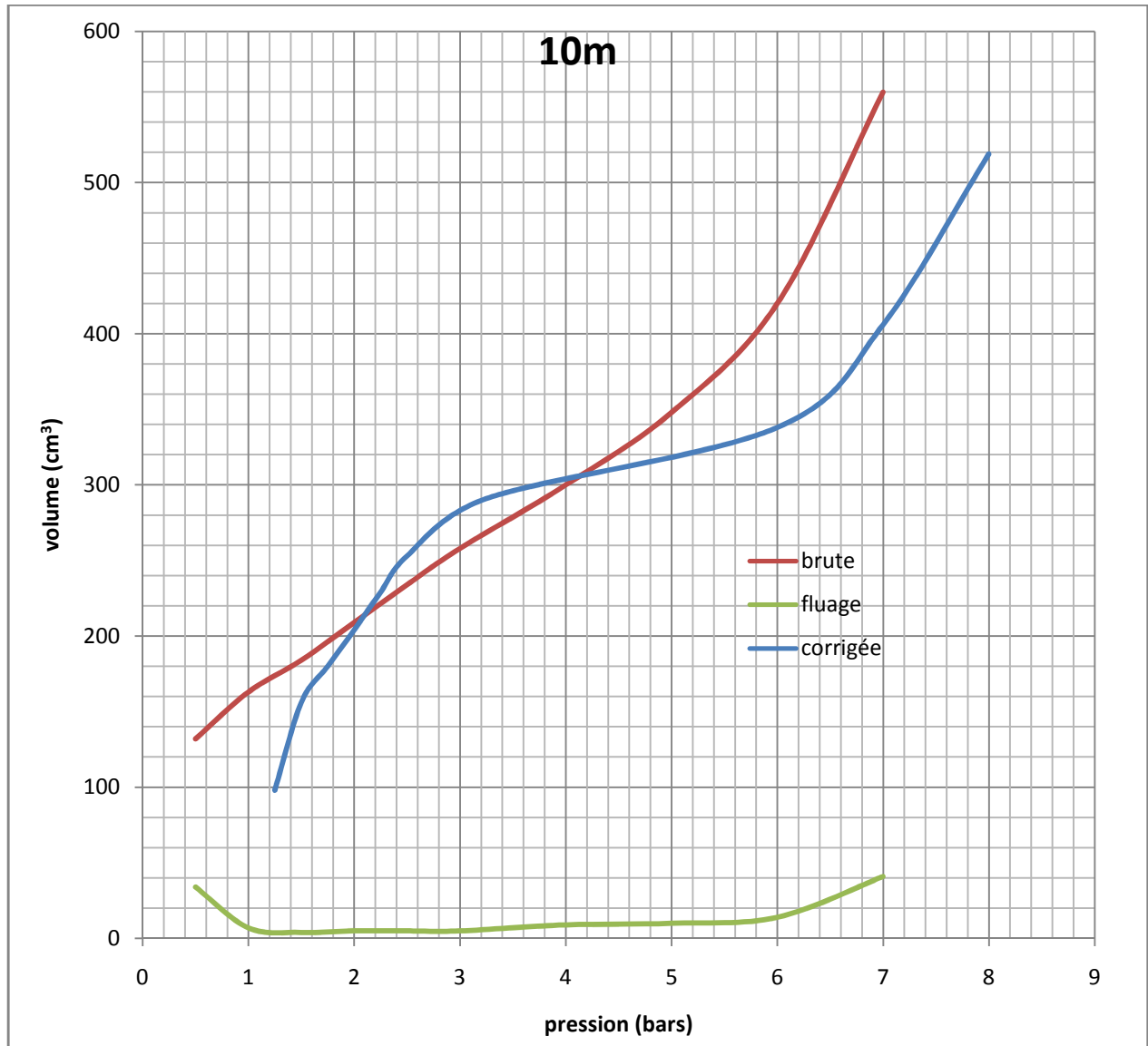


Figure IV.35 : la courbe brute et la courbe corrigée à 10m

Tableau IV.30 : Valeur de la pression et le volume à 11m

Pression (bar)	Volume (cm <sup>3</sup> )	$\Delta V$ (cm <sup>3</sup> )	Volume corrigé	Pression corrigée
0,5	40	8	32	1,35
1	74	9	65	1,6
1,5	82	2	80	1,85
2	94	3	91	2,1



## CHAPITRE IV

### ANALYSE PRESSIOMETRIQUE

3	117	6	111	2,85
4	146	8	138	3,6
5	190	10	180	4,35
6	248	18	230	7,1
8	380	40	340	9,1
10	571	51	520	11,1

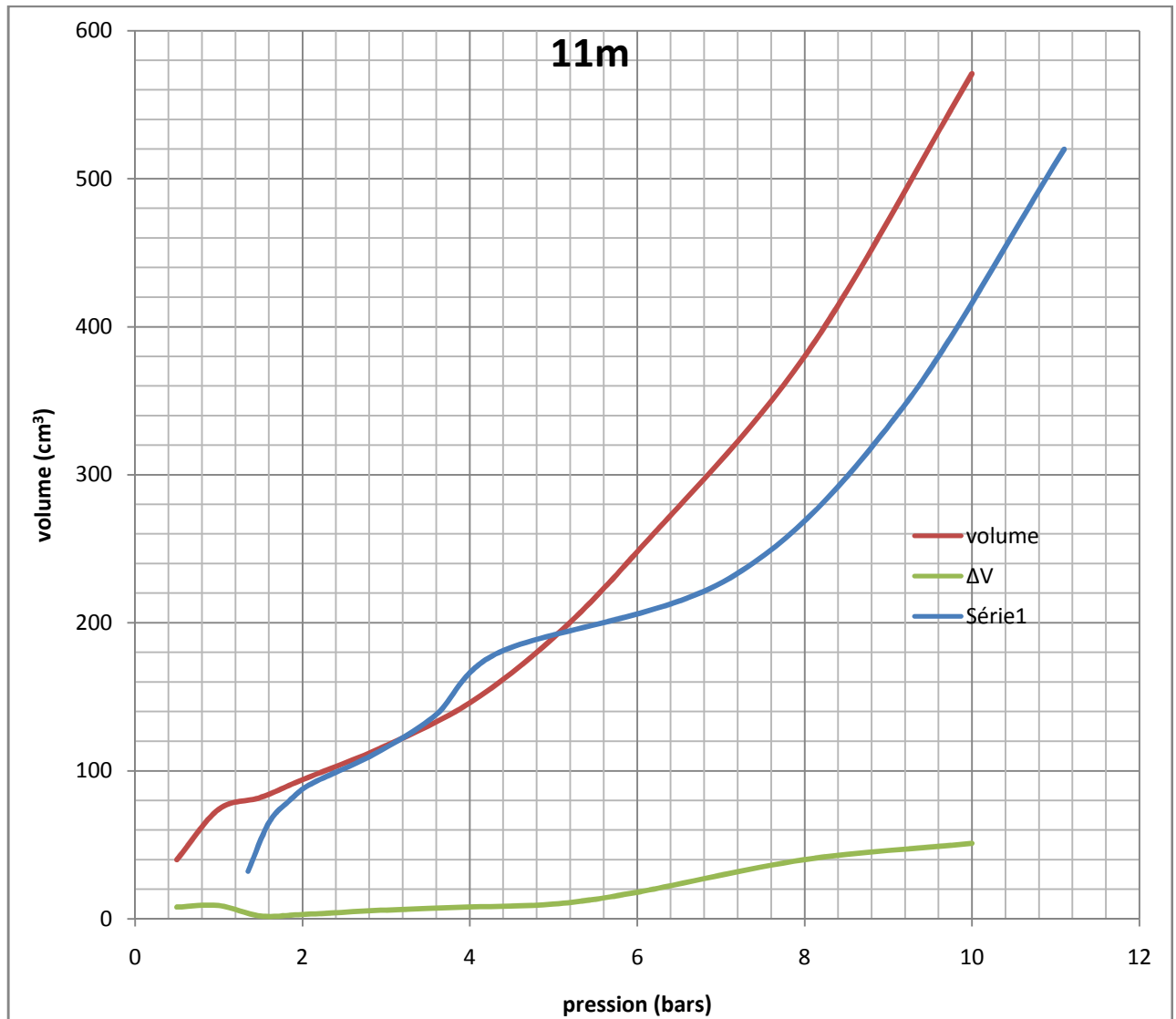


Figure IV.36 : la courbe brute et la courbe corrigée à 11m

Tableau IV.31 : Valeur de la pression et le volume à 12 m

Pression (bar)	Volume (cm <sup>3</sup> )	ΔV (cm <sup>3</sup> )	Volume corrigé	Pression corrigée
1	92	11	81	1,95
2	106	3	103	2,7
3	120	3	117	3,45
4	142	4	138	4,2
5	177	7	170	4,95



## CHAPITRE IV

### ANALYSE PRESSIOMETRIQUE

6	223	13	210	5,7
7	290	21	269	6,45
8	370	24	346	9,2
9	470	34	436	10,2
10	642	42	600	11,2

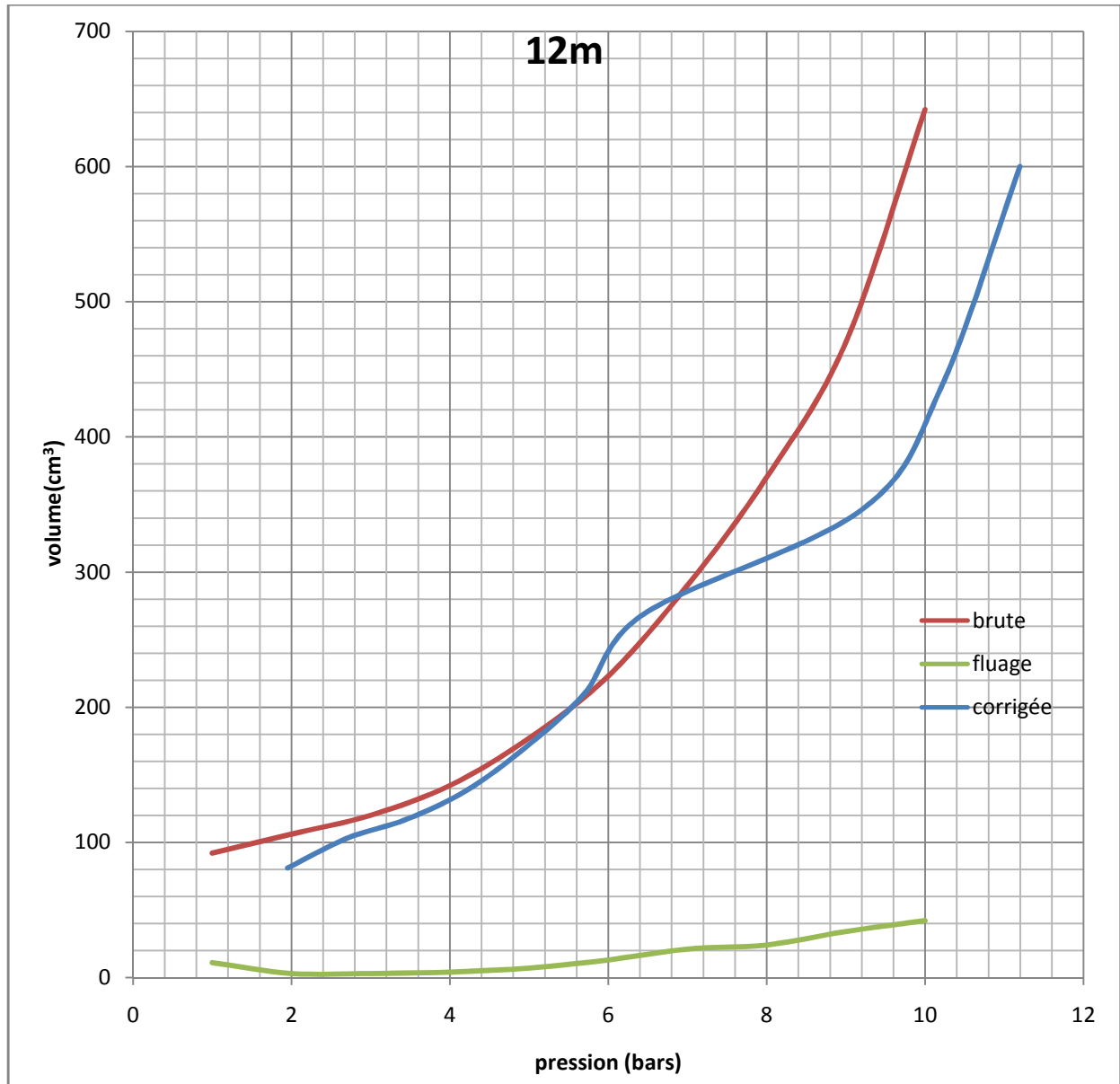


Figure IV.37: la courbe brute et la courbe corrigée à 12m



**IV.6. Calculs du module pressiométrique  $E_p$  et  $P_l$**

Après correction des courbe pressiométrique on passe à la deuxième phase qui est la détermination des modules et les limites pressiométrique.

$$E_p = 2(1 + \nu)(V_0 + V_m) \frac{\Delta P}{\Delta V} \quad (IV.3)$$

Avec :

$\nu$ : Le coefficient de Poisson du sol

$V_0$  :Le volume de la sonde au repos

$V_m$  :La variation de volume correspondant à la valeur moyenne de la pression appliquée dans la phase pseudo-élastique.

$\frac{\Delta P}{\Delta V}$ :L'inverse de la pente de la partie linéaire de la courbe

Les résultats sont récapitulés dans le tableau suivant :

**Tableau IV.32 : Le module pressiométrique E et la pression limite**

				$P_l$					
	La profondeur (m)	$P_0$ (bars)	$V_0$	$V_m$	$P_f$ (bars)	$V_f$	$P_l$ (bars)	$E_p$ (bars)	$E_p/P_l$
<b>Point 1</b>	2	0,45	130		4,2	500	4,7	5,37032432	1,142622
				69,					
	2	0,45	90	49,2	4,2	250	6,2	8,67825	1,39971774
	3	0,55	87	47,8	4,3	223	7,3	9,88698529	1,35438155
	4	0,65	108	59,4	5,4	260	7,4	13,915125	1,8804223
	5	0,75	112	61,5	5,5	340	6,5	9,61479167	1,47919872
	6	0,85	80	41,6	1,6	288	2,1	1,16630769	0,55538462
	7	0,7	71	38,7	3,2	237	5,7	4,39460843	0,77098394
	9	1,15	102	56,9	5,9	343	7,9	8,33071162	1,05452046



## CHAPITRE IV

### ANALYSE PRESSIOMETRIQUE

	10	1,25	110	66	11	293	15	24,9429508	1,66286339
	11	1,85	60	41,1	11,1	144	17,1	29,613875	1,73180556
<b>Point 2</b>	2	0,45	155	79,2	1,7	210	5,2	14,1584545	2,72277972
	3	0,55	90	50,3	5,3	278	7,3	9,42920479	1,29167189
	4	0,65	108	59,4	5,4	319	6,4	10,0241659	1,56627592
	6	0,6	112	59,1	3,1	378	5,6	4,2775	0,76383929
	7	0,95	123	63,2	1,7	423	2,45	1,23823	0,5054
	8	1,05		4,8	4,8	6	6,8	7,98	1,17352941
	10	1,25	90	55	10	400	16	10,8866935	0,68041835
	11	1,85	92	57,1	11,1	212	15,1	30,5717125	2,02461672
	12	1,95	100	61,2	11,2	250	15,2	26,4421733	1,73961667
<b>Point 3</b>	2	0,45	106	54,95	1,95	420	4,2	2,04519268	0,48695064
	3	0,55	96	53,3	5,3	279	7,3	10,3082268	1,41208586
	4	0,65	102	55,4	4,4	372	6,4	5,81505556	0,90860243
	5	0,75	102	53,75	2,75	306	6,5	4,06171569	0,62487934
	6	0,75	105	58	5,5	320	7,5	9,57909302	1,2772124
	7	0,95	110	58,95	3,95	322	7,7	6,35953302	0,82591338
	8	1,05	103	53,55	2,05	400	2,55	1,40209764	0,54984221
	9	1,15	116	60,65	2,65	592	4,9	1,48074265	0,30219238
	10	1,25	98	55	6	338	8	8,0548125	1,00685156
	11	1,35	32	23,1	7,1	230	11,1	4,25633586	0,38345368
	12	1,95	81	49,7	9,2	346	11,2	9,51150755	0,84924175



### Remarque

L'approche Menard est de prendre un coefficient de poisson égal 0,33, mais il est souvent donné en fonction du type de sol ou bien du type de drainage .pour notre cas on opte pour la valeur de 0,33.

### IV.6.1. Module pressiométrique E

- ❖ Sondage SP1 entre 2 et 11m de profondeur nous avons enregistré des valeurs de E compris entre 4 et 30 bars. On enregistre aussi une valeur assez faible qui est de 1 pour une profondeur de 6 m.
  
- ❖ Sondage SP2 entre 2 et 12m de profondeur nous avons enregistré des valeurs de E compris entre 4 et 31 bars. On enregistre aussi une valeur assez faible qui est de 2 pour une profondeur de 7 m.
  
- ❖ Sondage SP3 entre 2 et 12m de profondeur nous avons enregistré des valeurs plus faibles que les SP précédents. On peut la considéré égale a 1,8bars

On remarque que lorsque le module pressiométrique augmente la pression limite aussi augmente,

on a pour une profondeur 2m (SP1)  $P_l = 6,2$  bars et  $E_p = 8,67$  bars et pour 5 m de profondeur on a  $P_l = 6,5$ bars  $E_p = 9,61$ bars

### Forage 1

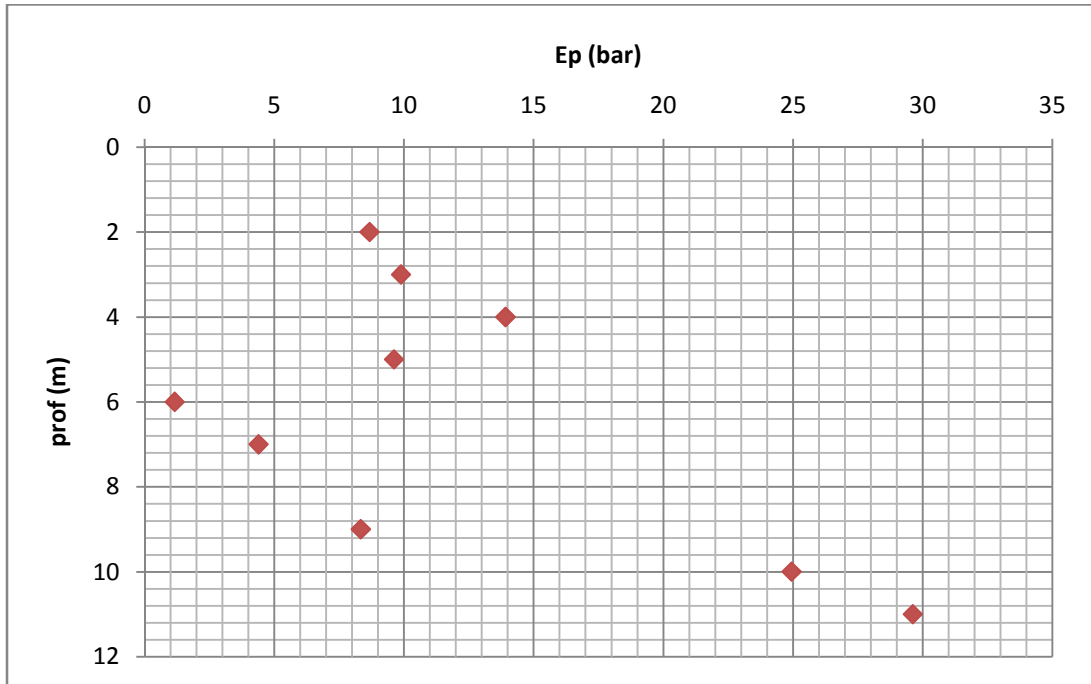


Figure IV.38 : module pressiométrique en fonction de la profondeur du forage 1

Forage 2

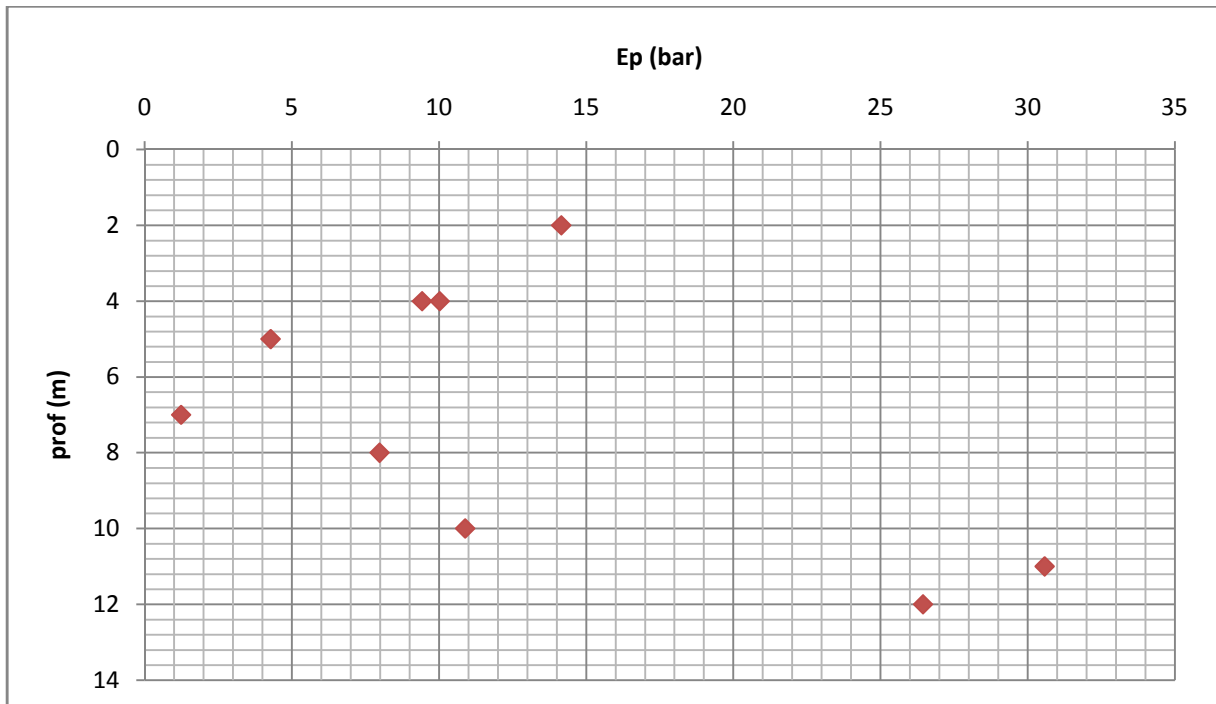


Figure IV.39 : module pressiométrique en fonction de la profondeur du forage 2



Forage 3

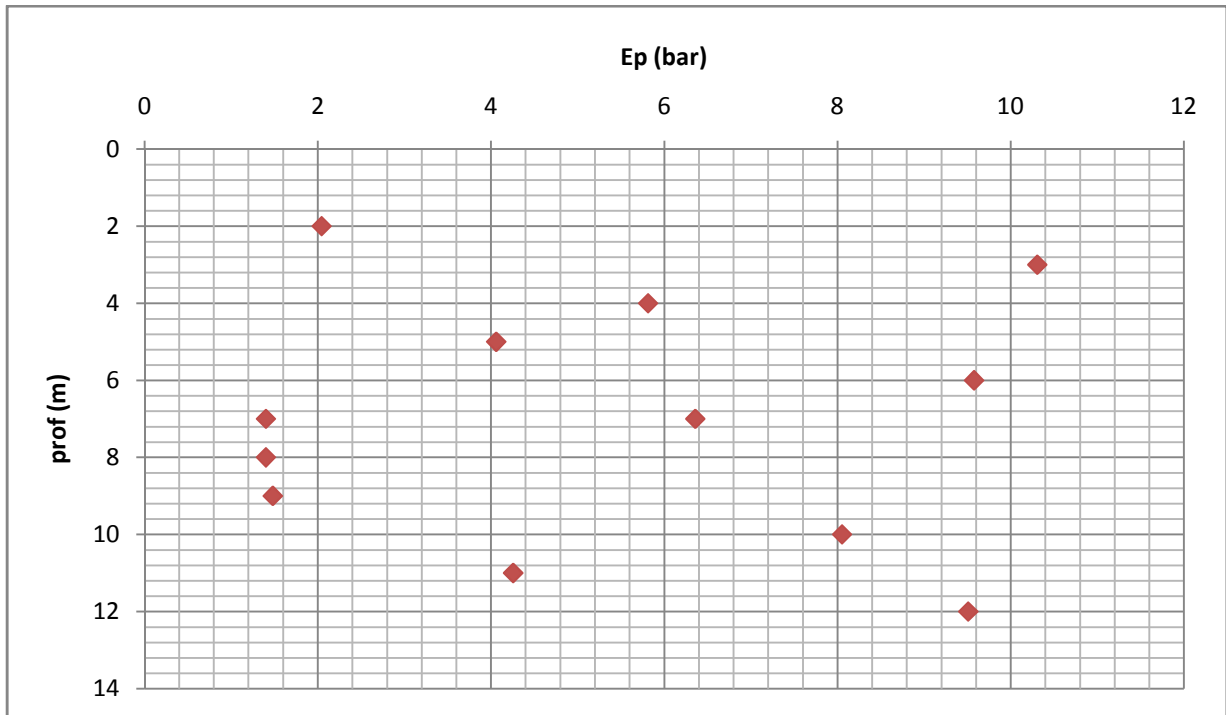


Figure IV.40 : module pressiométrique en fonction de la profondeur du forage 3

IV.6.2. La pression limite

On remarque sondage SP1 la valeur minimale est de 2,1bars et la valeur maximale est de 17 ,1bars. Et pour Sondage SP2 la valeur minimale est de 2,45bars et la valeur maximale est de 16 bars, pour sondage valeur minimale est de 2,55 bars et la valeur maximale est de 11,2 bars



Forage 1

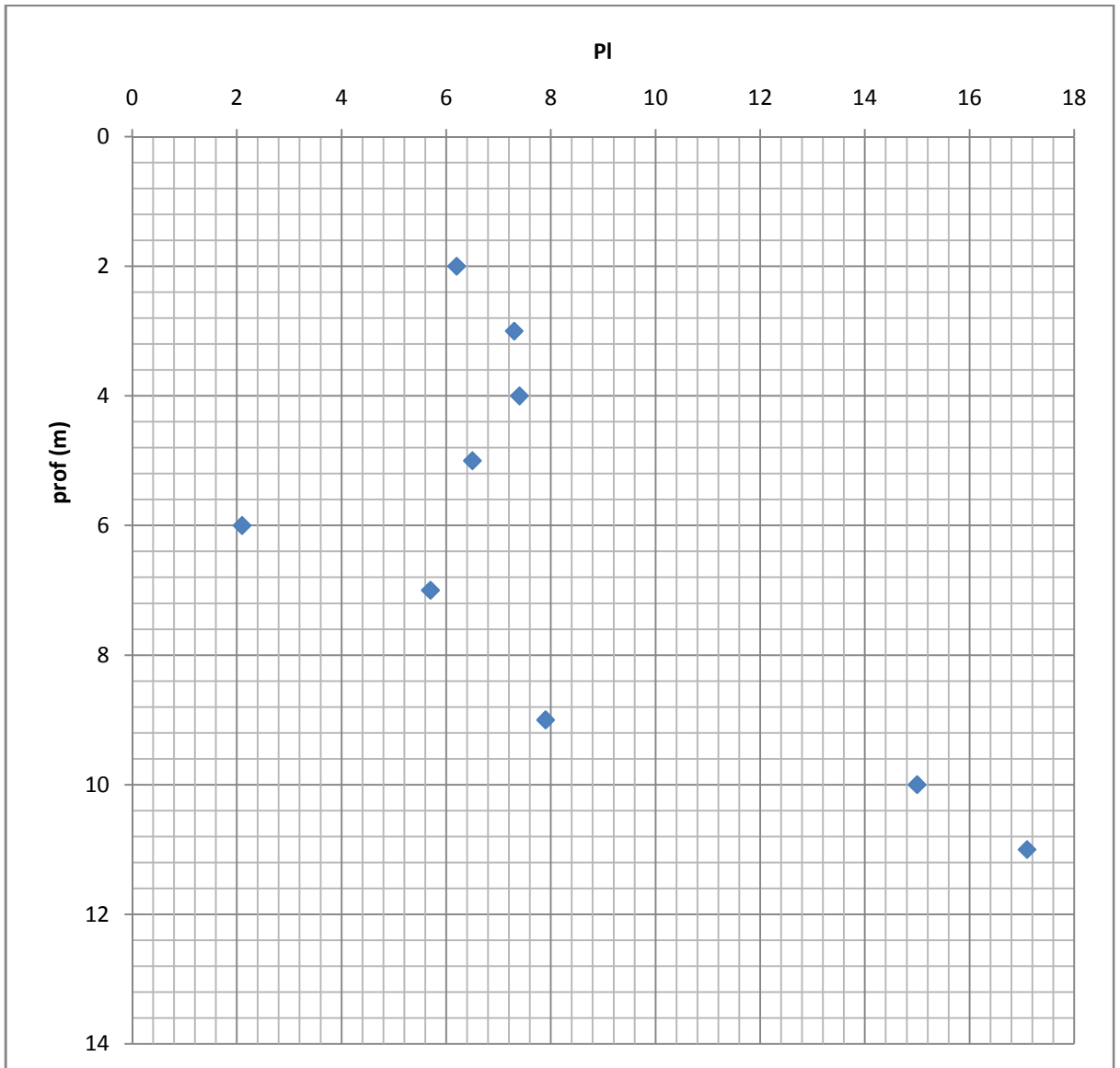


Figure IV.41 : la pression limite en fonction de la profondeur du forage 1



Forage 2

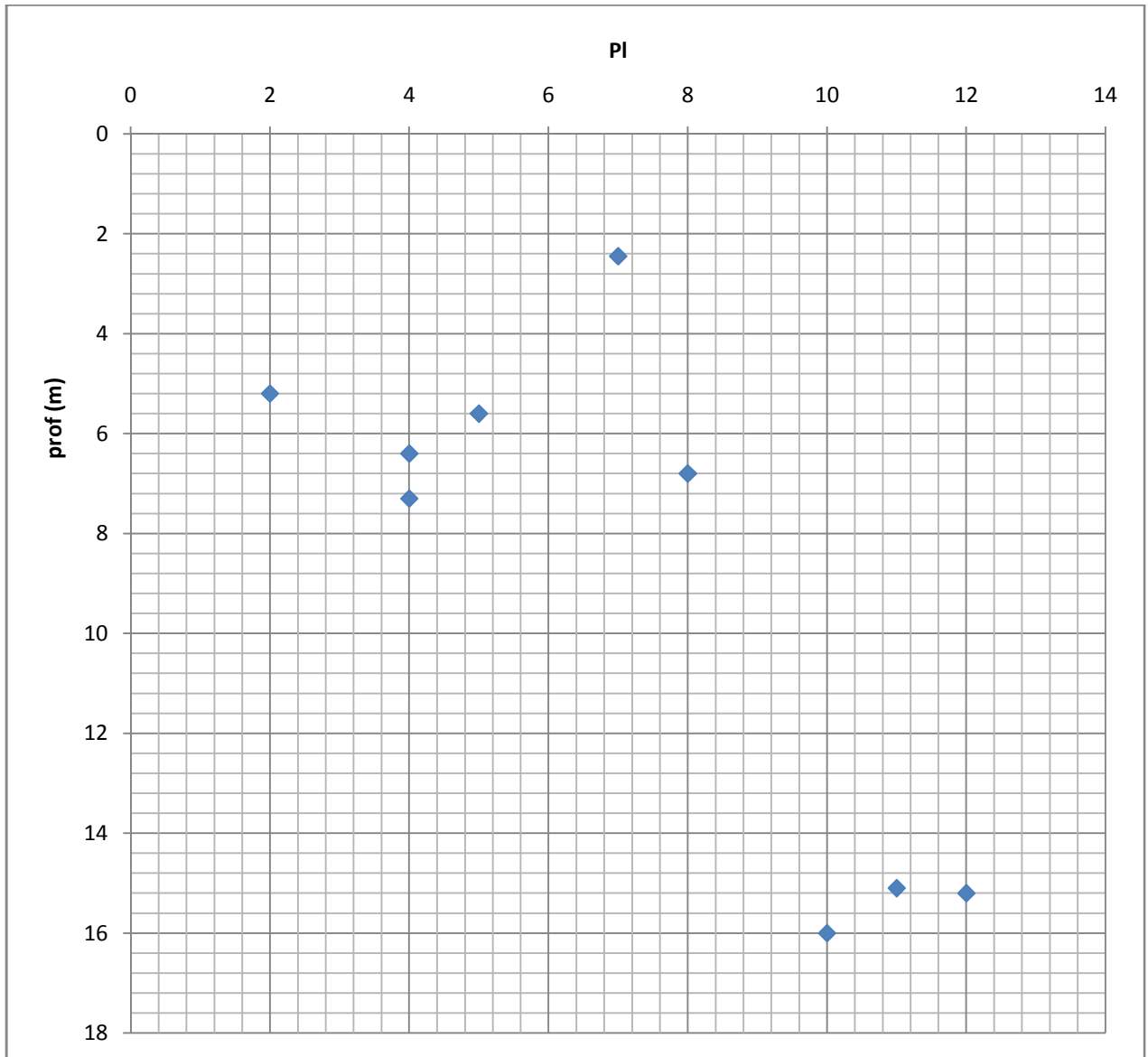


Figure IV.41 : la pression limite en fonction de la profondeur du forage 2



Forage 3

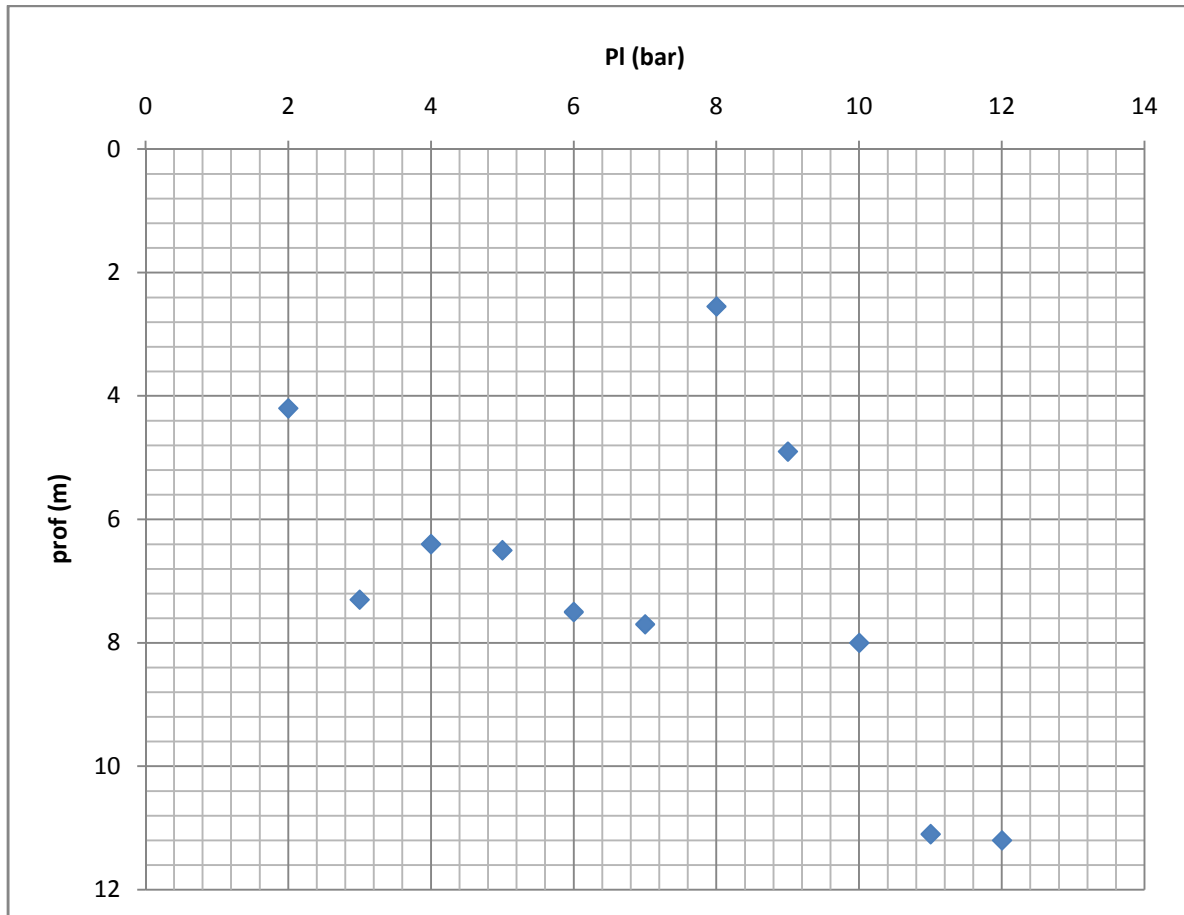


Figure IV.43 : la pression limite en fonction de la profondeur du forage 3

IV.6.3. La Définition du rapport  $E_p/P_l$

Ce rapport est une caractéristique qui définit le type du sol étudié (Tableau I-3 : Classification selon le rapport  $(E_m / P_l)$  chapitre I page 15)

Après les résultats trouvés dans le tableau précédent il faut noter qu'un remaniement c'est produit pendant les forages car on a trouvé un rapport  $E_p/P_l \leq 5$  on peut conclure que les sols est remanié.

IV.7. Facteur pouvant influencer l'essai pressiométrique

- ❖ L'essai pressiométrique est soumis à plusieurs facteurs qui peuvent influencer les valeurs des caractéristiques pressiométrique.



### IV.7. Influence des cellules de garde

Dans le pressiomètre Ménard, les cellules de garde utilisées permettent de mesurer un champ de déformation cylindrique au niveau de la cellule centrale. Cependant pour d'autres types de pressiomètre, il n'existe pas de cellules de garde. Ainsi des études de comparaison, ont noté qu'il n'y a aucune différence significative qu'il s'agisse du module de déformation, des pressions limites et des pressions de fluage.

### IV.8 Simulation de l'essai pressiométrique

On considère le modèle élastoplastique de Mohr-Coulomb, les paramètres utilisés dans la simulation sont récapitulés dans le tableau suivant :

**Tableau IV.33 : les propriétés du sol**

Module de Young E(KPa)	Module de compressibilité K(MPa)	Module de cisaillement G (KPa)	L'angle de frottement $\varphi$	Cohésion $C_u$ (KPa)
434981	13	160000	23	38



IV.8.1. Exemple de courbes numériques

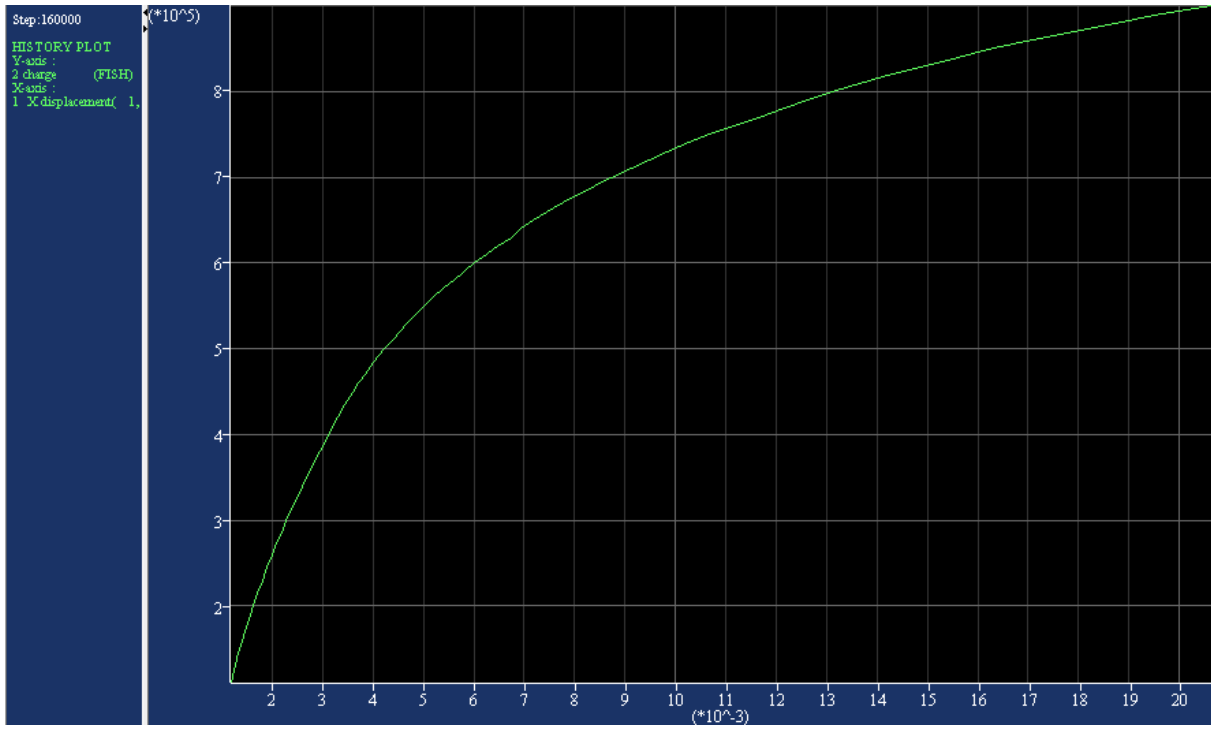


Figure IV .44 : Courbes pressiométriques

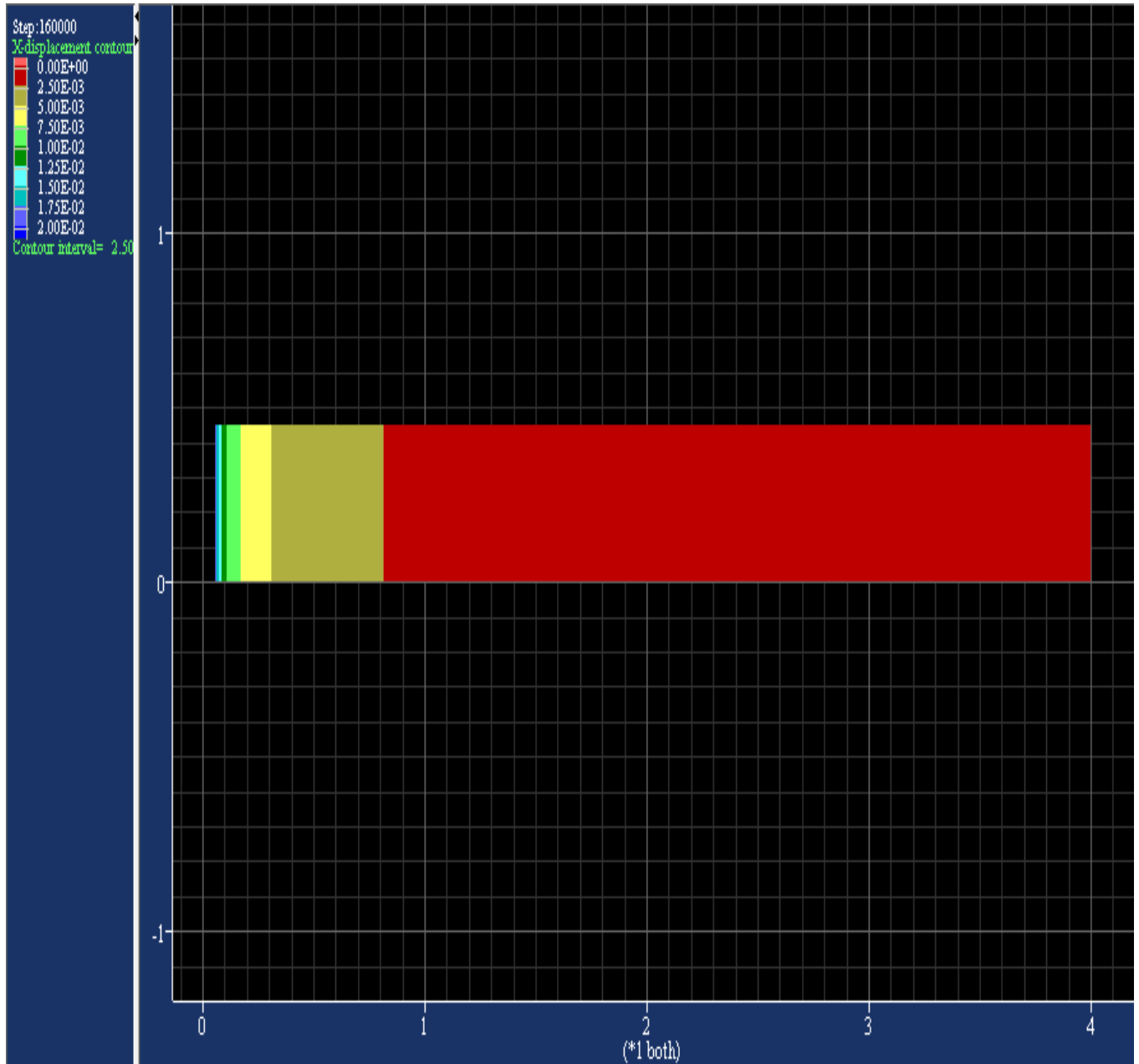


Figure IV.45 : Le déplacement au niveau du grillage

On remarque que les déformations sont plus importantes au voisinage de la sonde (pression appliquée), et de plus en plus qu'on s'éloigne de la sonde les déformations s'annulent.



### IV.8.2 Conditions aux limites

Afin de simuler numériquement l'essai pressiométrique, nous avons imposé les conditions aux limites de la figure (IV.46 -8) : le sol est libre sur les parois verticales du forage et un déplacement vertical est possible sur les deux frontières verticales.

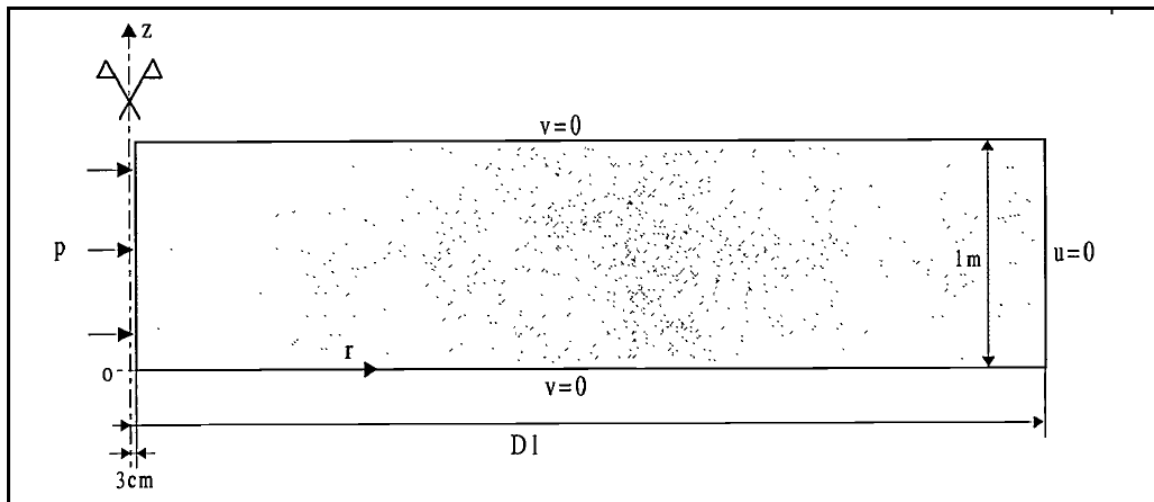


Figure IV.46 : Caractéristiques géométriques du modèle 2D axisymétrique

Les conditions aux limites sont similaires à celles appliquées dans les calculs par Flac 2D

$$\text{ini sxx}=-180\text{e}3 \quad \text{syy}=-360\text{e}3 \quad \text{szz}=-180\text{e}3$$

### IV.8.3. Interprétation des résultats

L'expansion de la sonde pressiométrique est alors simulée en augmentant la charge uniforme depuis 0.0, jusqu'à la pression limite. Pour chaque étape de calcul, on obtient les déplacements et les contraintes en tout point du massif. Pour obtenir la variation de volume globale de la sonde, on effectue le calcul suivant à partir des déplacements radiaux des nœuds à la surface de la sonde.

$$dV_i = 2\pi * U_{ri} * r_0 * dz \quad (\text{IV.6})$$

Où :

**r0** : le rayon initial de la sonde et du forage

**Uri** : le déplacement horizontal au nœud i

**dz** : la distance entre deux nœuds successifs



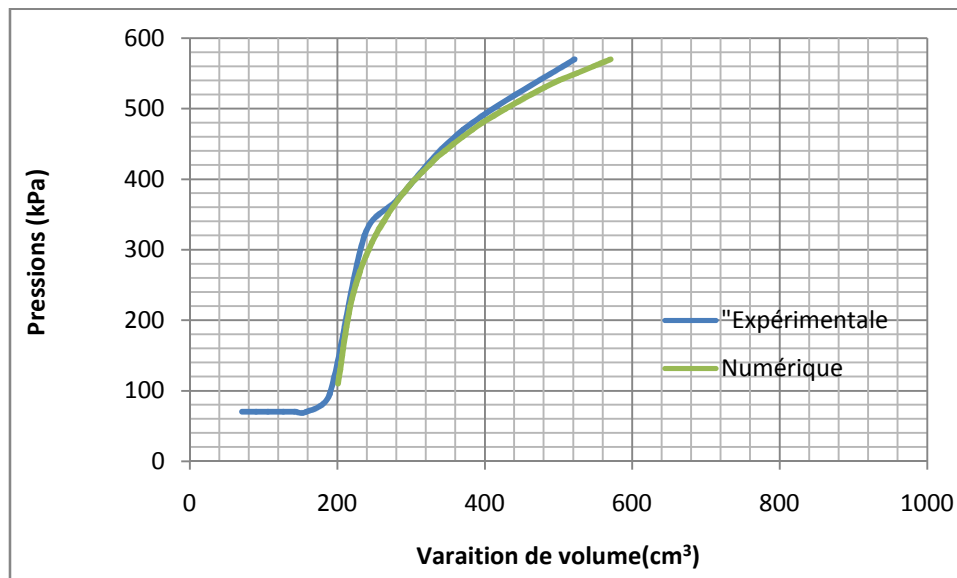
Nous pouvons tracer alors à partir des résultats une courbe pressiométrique classique et variation de volume relative en fonction de la pression appliquée. A partir de cette courbe on détermine le module de cisaillement  $G$  et la pression limite  $p_l$ . Le calcul du module de cisaillement  $G$  se fait dans la partie quasi- linéaire :

$$G = \frac{\Delta P}{\Delta V/V_0} \quad (\text{IV.7})$$

Dans cette partie on présentera une simulation de l'essai pressiométrique avec le modèle de Mohr Coulomb en analysant l'influence de quelques paramètres.

On a définie précédemment le modèle de Mohr coulomb et ces paramètres (**Tableau IV.29**) La figure ci-dessus présente une courbe expérimentale et une courbe résultant de la simulation.

L'influence de l'angle de frottement est représentée sur la figure suivante :



**Figure VI.47 : Simulation de l'essai pressiométrique**

#### IV.8.4. Influence de l'angle de frottement

On considère un maillage simple, avec les mêmes paramètres choisis au début mais en variant la valeur de l'angle de frottement les valeurs sont récapitulées dans le tableau On fait trois calculs en considérant trois valeurs de  $\varphi$ .

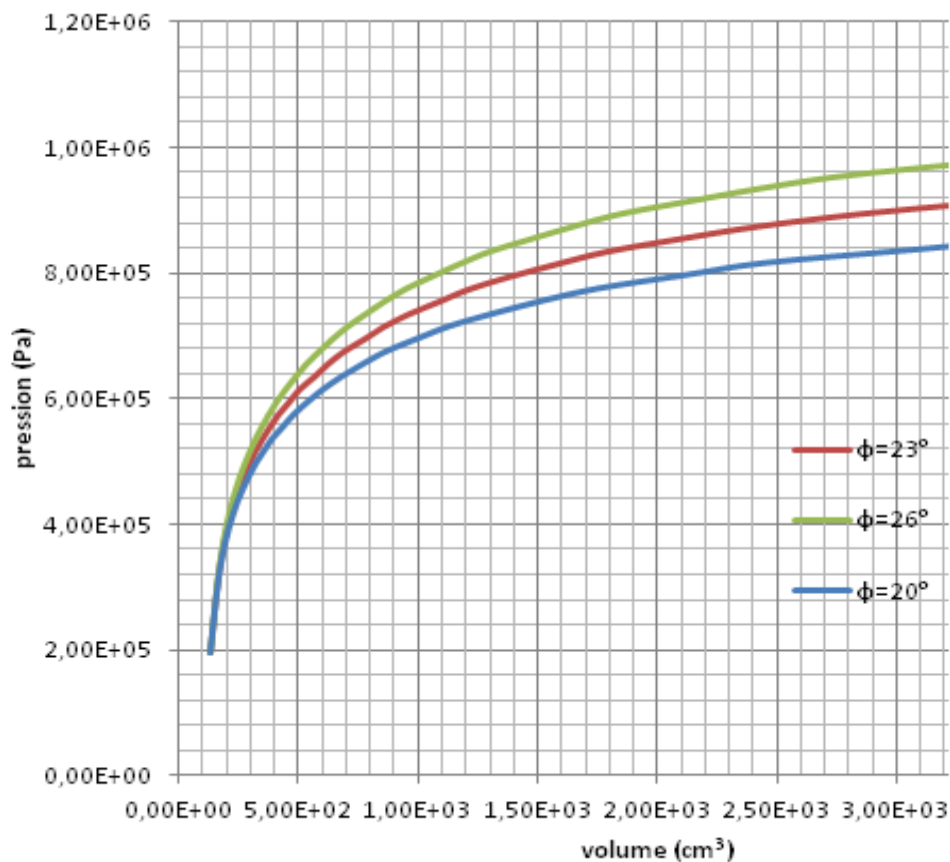


### Remarque

Des essais de cisaillement ont été effectués au laboratoire (LNHC) les résultats montrent que l'angle de frottement est compris entre 17 et 30° alors on opte pour une valeur de cisaillement moyenne égale à 23°.

L'influence de l'angle de frottement est représentée sur la figure suivante :

$\Phi 1$	$\Phi 1$	$\Phi 1$
23°	20°	26°



**Figure VI.48 : Influence de l'angle de frottement**

On peut constater que les paramètres déduits de la courbe de simulation qui sont les plus proches à ceux de la courbe expérimentale sont :

- On remarque que plus l'angle de frottement n'est grand, plus la pente de la courbe pressiométrique est faible, ce qui augmente le module pressiométrique  $E_m$ .
- On remarque aussi que lorsque l'angle de frottement augmente, la pression limite augmente pour  $\phi=20^\circ$  on a  $Pl= 8 \cdot 10^3$  bars, et pour  $\phi=26^\circ$  on a  $Pl=3,84$  bars

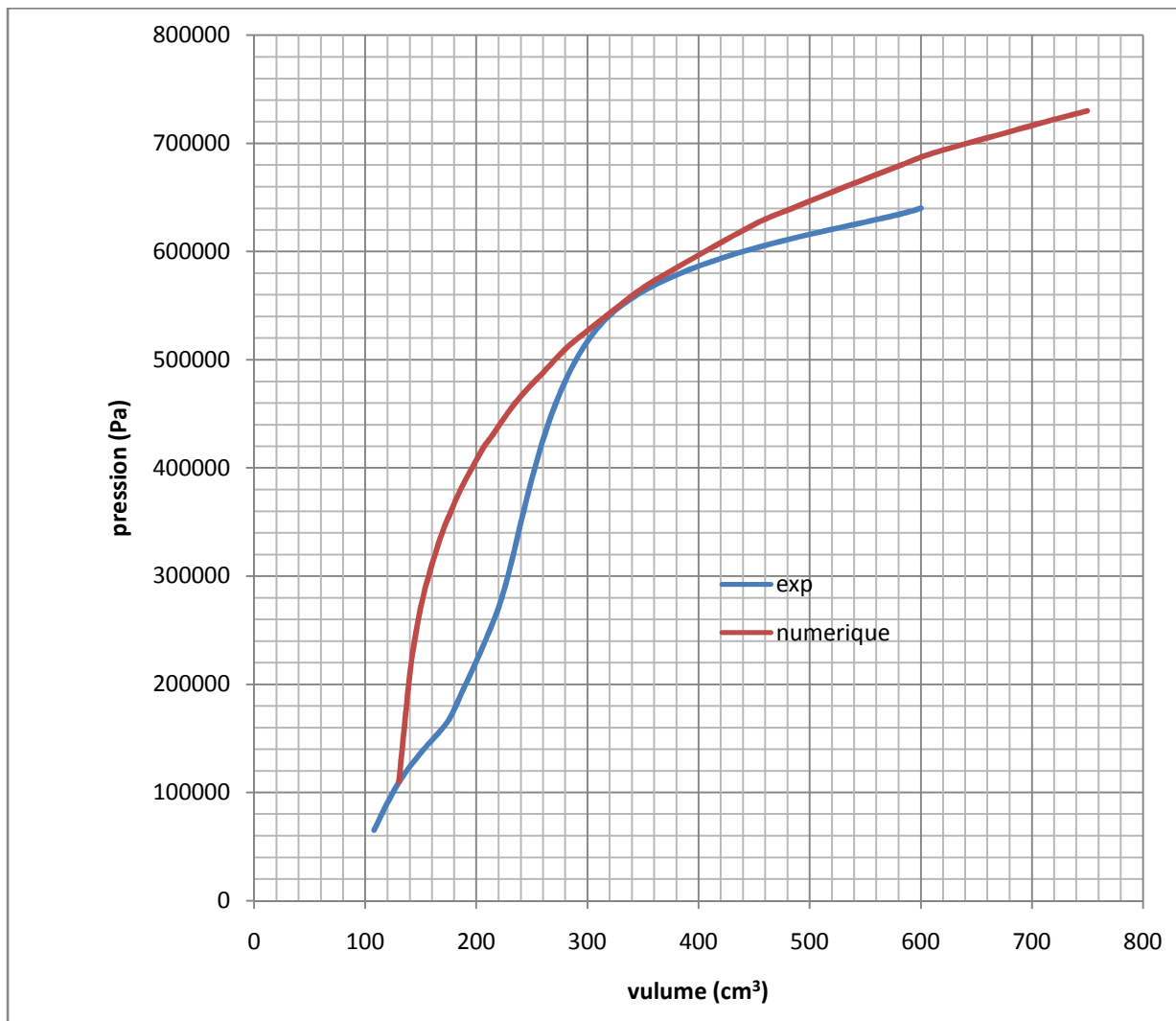


### IV.8.5. Simulation des courbe pressiométrique expérimentale

Une simulation de quelques courbes pressiométrique pour différentes profondeur dont le but de déterminer les caractéristiques du sol étudié à partir du logiciel Flac.

Les figures ci-dessous représente une comparaison entre deux courbe pressiométrique une tracée expérimentalement et l'autre avec Flac, on peut remarquer que les deux courbes ont presque la même pente ; ce qui nous aide à donner une identification plus exacte des paramètres caractéristiques du sol.

**Exemple** : pour différentes profondeurs (SP2) on a



**Figure VI.49 : courbe pressiométrique expérimentale et numérique à 2m(SP2)**

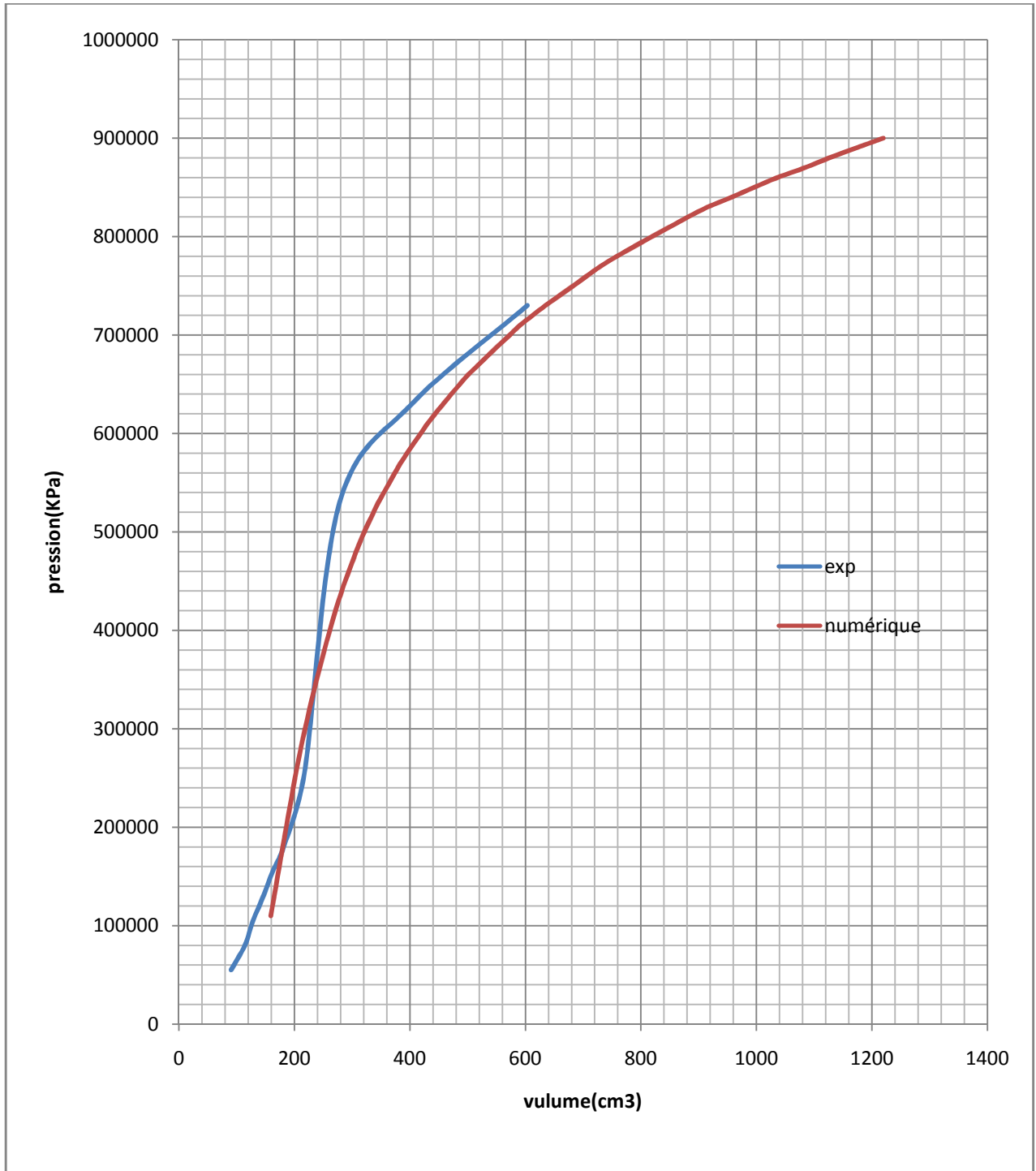


Figure VI.50 : courbe pressiométrique expérimentale et numérique à 3m(SP2)

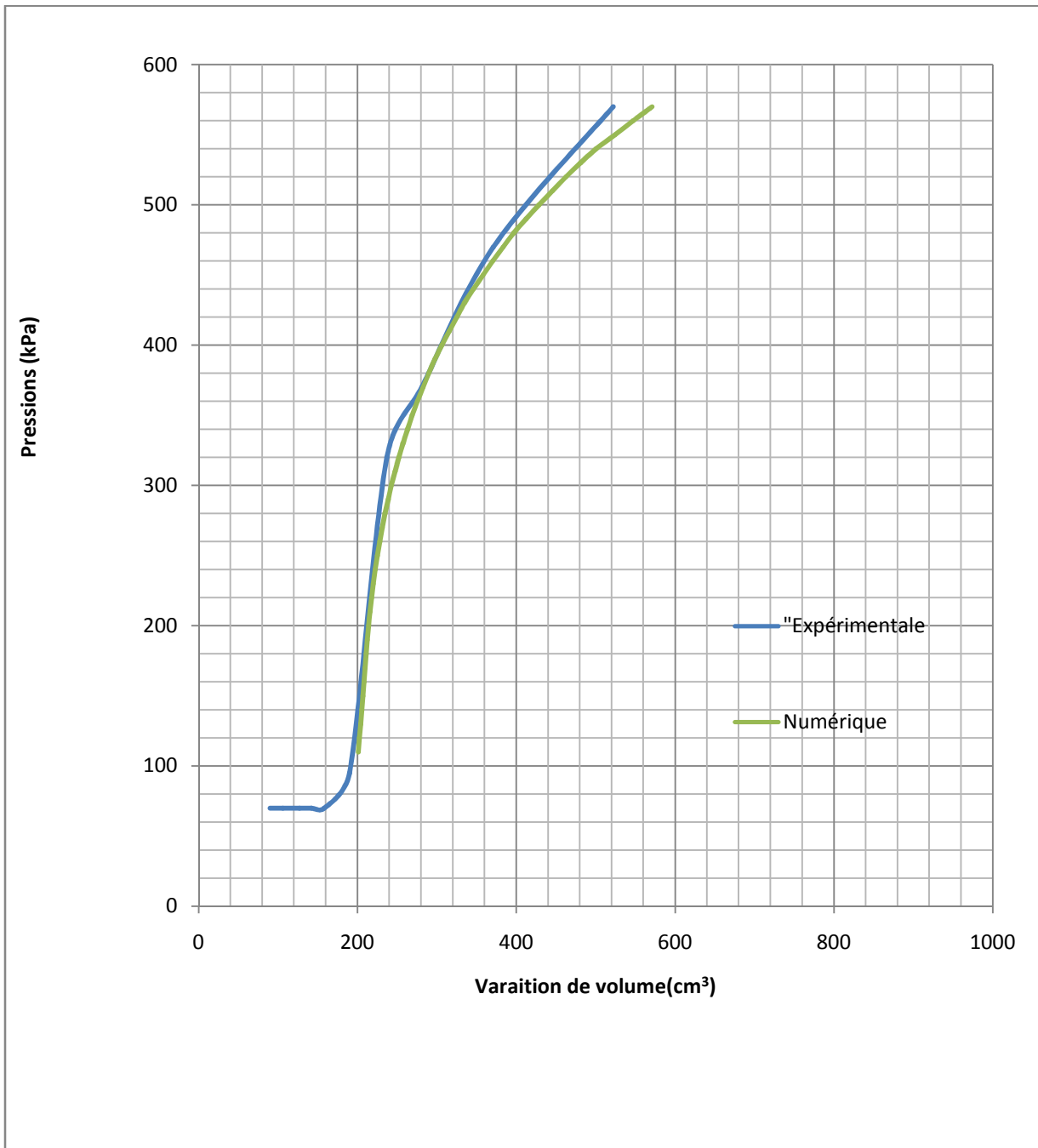


Figure VI.51 : courbe pressiométrique expérimentale et numérique à 7m (SP2)

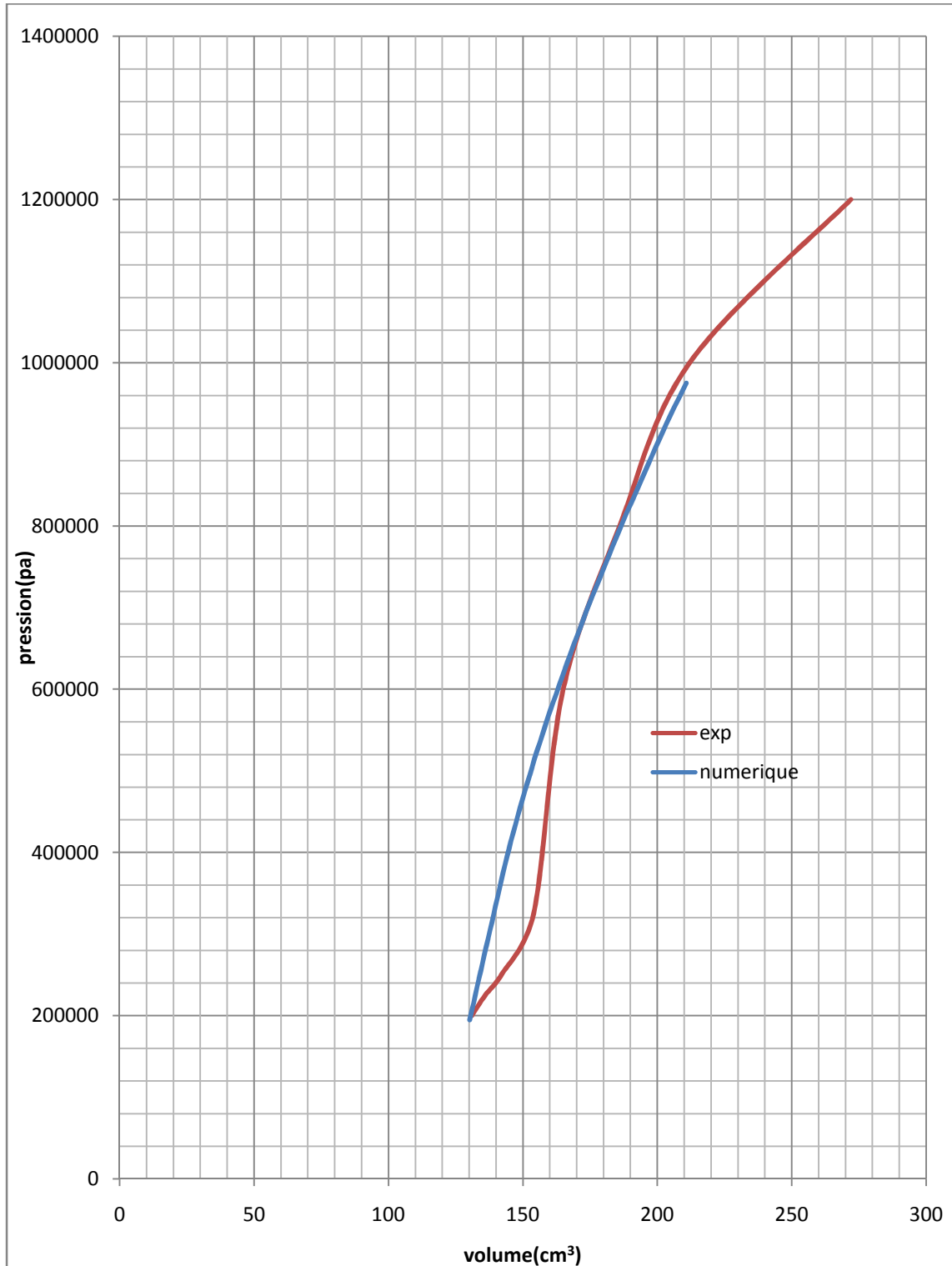


Figure VI.52 : Courbe pressiométrique expérimentale et numérique à 10m(SP2)

Après la comparaison des paramètres tirés à partir des courbes expérimentales et ceux tirés des courbes numériques, ces paramètres sont récapitulés dans le tableau suivant :



### IV.8.6. Calcul des modules de cisaillement pour les différentes couches

A partir des résultats calculés précédemment on peut calculer analytiquement le module de cisaillement des les différentes couches à partir de la formule suivante :

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

Les valeurs sont récapitulées dans le tableau suivant :

Pour le calcul on a pris les cas les plus défavorables

**Tableau IV.34 : Les paramètres tirés à partir des courbes simulées**

La couche	Le module pressiométrique Ep (bars)	La densité $\gamma_d$	La cohésion Cu (bars)	La cohésion $\phi$	Le module de cisaillemen G (bars)
1	4,27	2,03	0,122	19	1,60
2	9,495	2,06	0,078	23	3,56
3	9,88	2,03	0,13	27	3,71

### IV.7. Détermination de la résistance au cisaillement des sols à l'aide du pressiomètre

L'interprétation de l'essai pressiométrique en termes de résistance au cisaillement implique que plusieurs conditions doivent être satisfaites :

- Le sol doit être intact autour de la sonde.
- Le champ de déformation doit être plan et connu

Dans l'essai de Ménard, le sol autour de la sonde n'est pas intact : il est décomprimé au bord du trou et perturbé par l'opération de foration (trituration par l'outil et par le fluide d'injection). Quant au champ de déformation, il n'est connu que dans les sols cohérents : la déformation (pour la géométrie donnée de la sonde Ménard) est sensiblement plane et le champ de déformation est connu à chaque instant en raison de l'invariance du volume élémentaire si la sollicitation est non drainée.

Dans un sable, aucune de ces deux hypothèses n'est satisfaite : la déformation est non plane et la dilatance entraîne une variation non connue du volume élémentaire. Il s'ensuit que l'essai Ménard ne peut être interprété de manière analytique en termes de résistance au cisaillement.



La seule approche réaliste, confirmée par l'expérience, consiste à déduire la cohésion non drainée  $C_u$  de la pression limite conventionnelle à partir de Menard (1963), propose la relation empirique suivant telles que :

$$C_u = \frac{P_L - P_0}{2k_b}$$

$C_u$  : Résistance au cisaillement non drainée

$P_L$  : Pression limite

$P_0$  : Pression initiale

$2k_b$  : Coefficient empirique, typiquement égale à 5,5



Tableau IV.35 : valeurs de Cu

SP	PI (bars)	P0 (bars)	Cu (bars)
Point 1	4,7	0,45	0,77272727
	6,2	0,45	1,04545455
	7,3	0,55	1,22727273
	7,4	0,65	1,22727273
	6,5	0,75	1,04545455
	2,1	0,85	0,22727273
	5,7	0,7	0,90909091
	7,9	1,15	1,22727273
	15	1,25	2,5
	17,1	1,85	2,77272727
Point 2	5,2	0,45	0,86363636
	7,3	0,55	1,22727273
	6,4	0,65	1,04545455
	5,5	0	1
	5,6	0,6	0,90909091
	2,45	0,95	0,27272727
	6,8	1,05	1,04545455
	8,9	1,15	1,40909091
	16	1,25	2,68181818
	15,1	1,85	2,40909091
15,2	1,95	2,40909091	
Point 3	4,2	0,45	0,68181818
	7,3	0,55	1,22727273
	6,4	0,65	1,04545455
	6,5	0,75	1,04545455
	7,5	0,75	1,22727273
	7,7	0,95	1,22727273
	2,55	1,05	0,27272727
	4,9	1,15	0,68181818
	8	1,25	1,22727273
	11,1	1,35	1,77272727
11,2	1,95	1,68181818	

**Tableau IV.36: paramètres utilisés dans la simulation(SP2)**

<b>La profondeur (m)</b>	<b>C<sub>u</sub> simulée (KPa)</b>	<b>L'angle de frottement <math>\phi</math></b>	<b>Module de cisaillement G (Pa)</b>	<b>Module de compressibilité K (Pa)</b>
<b>2</b>	<b>67,5</b>	<b>30</b>	<b><math>1,5*10^7</math></b>	<b><math>1,3*10^6</math></b>
<b>3</b>	<b>120</b>	<b>30</b>	<b><math>7*10^5</math></b>	<b><math>5*10^6</math></b>
<b>6</b>	<b>120</b>	<b>25</b>	<b><math>5*10^6</math></b>	<b><math>4*10^6</math></b>
<b>7</b>	<b>45</b>	<b>25</b>	<b><math>1,2*10^7</math></b>	<b><math>2,3*10^7</math></b>
<b>10</b>	<b>42</b>	<b>28</b>	<b><math>0,9*10^7</math></b>	<b><math>1,3*10^6</math></b>

**IV.8. Conclusion**

Dans ce chapitre on a fait une simulation d'un essai pressiométrique en utilisant l'outil numérique Flac, en considérons un modèle élastoplastique de Mohr Coulomb, ce qui nous a donner une identification des paramètres du sol étudié proche de la réalité. On peut conclure que pour faire une bonne identification des sols, il est important d'assurer les résultats obtenus avec les essais in situ, par un calcul à l'aide d'un outil numérique.



### V.1. Introduction

Lorsqu'un sol est soumis à une charge, ces particules adoptent une structure plus compacte. Ce phénomène est appelé tassement dépend de la nature du sol, dans ce chapitre nous allons aborder l'étude des tassements qui est très importante dans la conception des fondations, pour éviter les tassements excessifs qui sont susceptibles de nuire à la stabilité, et à l'efficacité des ouvrages, nous nous intéresserons à comparer les résultats des tassements calculés à partir d'un essai in situ qui est l'essai pressiométrique et un essai au laboratoire qui est l'essai œdométrique.

Donc on présente dans cette partie les principales recherches menées sur L'interprétation du tassement du sol, dans le but d'expliquer, et calculer les différents paramètres de ce phénomène.

### V.2. Tassement de consolidation

Le tassement de consolidation est le déplacement vertical de la surface du sol, correspondant à un changement de volume à n'importe quel stade du processus de consolidation. La consolidation est la réduction graduelle du volume d'un sol complètement saturé, à faible perméabilité due au drainage de quelques quantités d'eau dans les pores. Cette action se poursuit jusqu'à ce que l'excès de pression interstitielle dans les pores dû à une augmentation des contraintes totales, ait été complètement dissipé. Le tassement de consolidation est un phénomène qui dépend du temps ; il se produit dans les sols à grains fins qui présentent un faible coefficient de perméabilité. La vitesse de tassement dépend du taux de drainage de l'eau interstitielle. Le tassement de consolidation peut être calculé en laboratoire à partir des essais œdométriques.

### V.3. Compression secondaire

L'expérience montre que le sol continu à tasser une fois la consolidation primaire est achevée. Cette nouvelle phase de tassement s'appelle la consolidation secondaire. Elle est principalement due à l'arrangement graduel des particules de l'argile pour une configuration plus stable et à des modifications viscoélastiques des couches d'eau adsorbée. Donc le tassement secondaire, qui dépend du temps, se produit à contrainte effective constante, sans qu'il y ait variation des pressions interstitielles. Le tassement dû à la consolidation secondaire est faible dans la plupart des sols, son effet peut être généralement négligé.



V.4. Calcul des tassements

V.4.1. Introduction

La consolidation d'un sol est l'ensemble des phénomènes de dissipation des surpressions inertielles par évacuation d'eau et diminution du volume des vides. On a étudié au laboratoire ce type de déformation par l'essai de compressibilité à l'oedomètre. Celui-ci traduit des courbes qui représentent la relation contrainte déformation. Quatorze essais (14) à l'oedométrie ont été réalisés au sein du laboratoire national de l'habitat et la construction (unité de Rouïba). L'oedomètre avec chargement par l'avant et une cellule oedométrique de 50 mm de diamètre et 19 mm de hauteur ont été utilisées pour la réalisation de ces essais. Les résultats sont récapitulés dans le tableau suivant :

Tableau V.2 : résultats de l'essai oedométrique

N°SC	Prof(m)	$\sigma_c$ (bars)	$\sigma_0$ (bars)	$\varepsilon$	$\varepsilon\% / \sigma_0$	Ct	Cg	type
1	4,60-5,00	1,1	0,96	0,14	15	0,152	0,062	NS
	5,6-6,00	2,00	1,30	0,70	54	0,110	0,051	NS
2	7,00-7,5	1,80	1,51	0,29	19	0,135	0,081	NS
	13,5-13,90	1,4	2,96	-1,56	-	0,147	0,091	S
	15,20-15,90	1,4	3,23	-1,83	-	0,125	0,044	S
3	10,70-11,30	2,20	2,31	-0,11	-	0,102	0,038	NS
	15,40-15,90	4,25	3,15	1,10	35	0,173	0,052	S
4	8,00-8,50	2,10	1,68	0,42	25	0,174	0,050	NS
	12,0-12,40	2,3	2,58	-0,28	-	0,143	0,032	NS
5	12,8-13,00	3,6	2,64	0,96	36	0,215	0,036	NS
	13,0-13,4	2,00	2,71	-0,71	-	0,135	0,064	NS
	13,40-14,2	1,8	2,89	-1,09	-	0,166	0,074	S
6	5,6-6,00	1,70	1,2	0,5	42	0,177	0,057	NS
	8,60-9,00	2,3	1,84	0,46	25	0,188	0,047	NS

Avec :

$\sigma_c$  : Pression de consolidation

$\sigma_0$  : Contrainte de consolidation

$$\varepsilon = \sigma_c - \sigma_0 \text{ (V.18)}$$

$\varepsilon \geq 1$  S : surconsolidé

$0,10 \leq \varepsilon < 1$  NS : Normalement à surconsolidé

$-0,10 \leq \varepsilon < 0,10$  N : normalement consolidé

$-1 \leq \varepsilon < -0,1$  Ns : Normalement à sous-consolidé

$\varepsilon < -1$  s : sous-consolidé

$\frac{\varepsilon}{\sigma_0}$  Rapport de surconsolidation

Ct : Constante de tassement



$C_g$  : Constante de gonflement

$C_t \square 0,100$  sol compressible

$C_g \square 0,050$  peut être compressible

On peut conclure que le sol étudié est un sol normalement à surconsolidé.

A partir des courbes œdométrique on avon calculé les tassements, ces deniers sont de 1,65cm (LNHC) pour une constante de tassement  $C_t$  égale à 21%. On peut conclure que le sol est un sol compressible.

**V .4. 2. Calcul des tassements pour chaque SP avec la méthode Ménard**

**V .4. 2.1. Formule générale des tassements**

**a-sol homogène :**

Le tassement  $w$  obtenu après stabilisation s’exprime par la formule suivante où les premiers et seconds termes représentent respectivement les influences des composantes sphérique et deviatore du tenseur (Ménard et Rousseau 1962) dans le domaine de la déformation pseudo-élastique.

$$w = w_c + w_d \quad (V.22)$$

Qui s’explique sous la forme :

$$w = \frac{\alpha}{9E} q \lambda_c B + \frac{\alpha}{9E} q B_0 \left[ \lambda_d \frac{B}{B_0} \right] \quad (V.23)$$

$E$  : module pressiométrique du sol supposé homogène

$P$  : pression moyenne appliquée par la semelle rigide sur le sol

$B_0$  :une longueur moyene de référence égale à 0,6m

$\alpha$ : le coefficient de structure variable selon la nature du sol et le rapport  $E/P_l$

$\lambda_c, \lambda_d$ : coefficient de forme fonction du rapport  $L/Bet$  de la longueur de la fondation

**Tableau V.6: Valeur du coefficient de structure  $\alpha$  selon le type de sol**

	Tourbe		Argile		Limon		sable		Sable et gravier	
	$E/P_l$	$\alpha$	$E/P_l$	$\alpha$	$E/P_l$	$\alpha$	$E/P_l$	$\alpha$	$E/P_l$	$\alpha$
<b>Surconsolidé</b>			$\square 16$	1		$\square 14$	2/3	$\square 12$	$\square 10$	1
<b>Normalement consolidé</b>		1	9-16	2/3	8-14	1/2	7-12	1/3	6-10	1/4
<b>Altéré et remani</b>			7-9	1/2		1/2		1/3		1/4



Tableau V.7 : Valeur du coefficient  $\lambda$

L/B	1		2	3	5	20
	Cercle	Carré				
$\lambda_c$	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5
$\lambda_d$	1	1,12	1,53	1,78	2,14	2,65

D'après les sondages carottés réalisé par le laboratoire (L.N.HC), on peut classer le terrain selon la profondeur comme suit :

Tableau V.8 : Valeur du coefficient  $\alpha$

Profondeur(m)	Type de sol	SP1		SP2		SP2	
		E/P <sub>l</sub>	$\alpha$	E/P <sub>l</sub>	$\alpha$	E/P	$\alpha$
0,2	Couche de goudron	1,14	1/3(sable graveleuse)	1,73	1/4(marne graveleuse sableuse)	0,48	1/2(Schiste marneux)
3	Sable	1,35		1,29		1,41	
5,5	Limon marneux	1,47		/		0,61	
6	Galets	0,55		0,76		1,27	
9	Limon marneux	1,05		/		0,3	
13,5	Marne	1		/		0,84	
18	Schiste marneux	/		/		/	

**b-sol hétérogène**

Pour la plupart des terrains. Es module de déformation varient avec la profondeur. En théorie ; le problème est très complexe. Mais pourvu que la variation du module pressiométrique avec la profondeur ne soit pas trop importante. On peu calculer et utiliser dans la formule des tassements des modules équivalents  $E_0$  et  $E_d$ . On fait un découpage de terrain sous la fondation de largeur B en tranche d'épaisseur B/2. (Figure V.11)

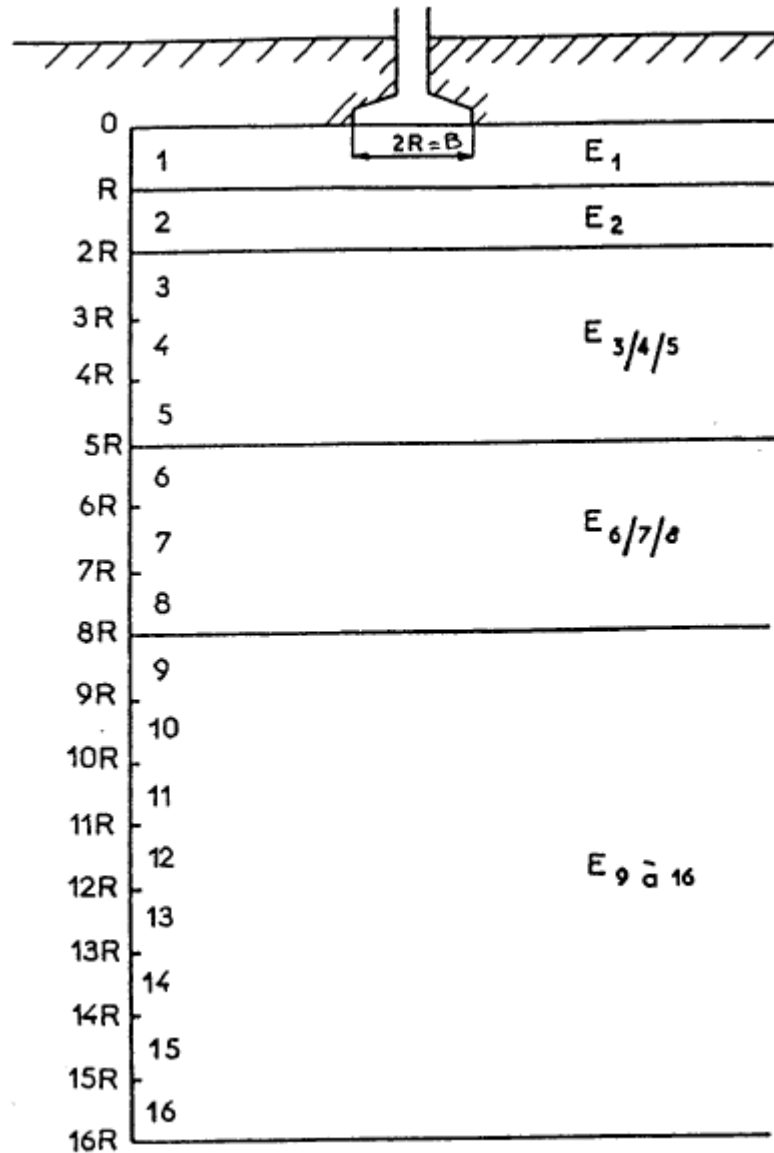


Figure V.6 : Schéma de découpage du sol dans le cas d'un sol hétérogène

Pour  $B \leq 0,6m$  :

On va utiliser la formule suivante pour laquelle les valeurs de  $\alpha$  peuvent être différentes pour chaque terme selon le type de sol.

$$w = \frac{\alpha}{9E_c} q \lambda_c B + \frac{2}{9E_d} q B_0 \left[ \lambda_d \frac{B}{B_0} \right] \alpha \quad (V.24)$$

$$E_c = E_1 \quad (V.25)$$



$$E_d = \frac{4}{\frac{1}{E_1} + \frac{1}{0,85E_2} + \frac{1}{E_{3/4/5}} + \frac{1}{2,5E_{6/7/8}} + \frac{1}{2,5E_{9\grave{a}16}}} \quad (V.25)$$

Pour notre cas on a R=2,83m on a le schéma de découpage du sol

	SP1	SP2	SP3
R=2,83m	$E_1=9,88bars$	$E_1=9,42bars$	$E_1=10,30bars$
2R=5,66m	$E_2=9,61bars$	$E_2=4,27bars$	$E_2=9,57bars$
3R=8,48m	$E_{3/4/5} = 16,13bars$	$E_{3/4/5}=16,66bars$	$E_{3/4/5}=9,495bars$
4R=11,32m			
5R=14,15m			
6R=16,98m			
7R=19,81m	$E_{6/7/8} = ?$	$E_{6/7/8} = ?$	$E_{6/7/8} = ?$
8R=22,64m			
9R=25,47m			
10R=28,3m			
11R=31,13m	$E_{9\grave{a}16} = ?$	$E_{9\grave{a}16} = ?$	$E_{9\grave{a}16} = ?$
12R=33,96m			
13R=36,79m			
14R=39,62m			
15R=42,45m			
16R =45,28m			

Figure V.7 : Schéma de découpage du sol dans le cas d'un sol étudié

Pour les valeurs  $E_{6/7/8}$ ,  $E_{9\grave{a}16}$  ne sont pas connues on peut utiliser cette formule selon

Menard :

$$E_d = \frac{3,2}{\frac{1}{E_1} + \frac{1}{0,85E_2} + \frac{1}{E_{3/4/5}}}$$

On fait le calcul des tassements sous m<sup>2</sup> fondation carrée (

Pour SP1 :

$$E_d = \frac{3,2}{\frac{1}{9,88} + \frac{1}{0,85 * 9,61} + \frac{1}{16,13}} = 11,42bars$$

$$\left\{ \begin{array}{l} q \leq 0,33qu = 0,33 * 2,04 bars = 0,6 bars \\ E_d = 11,42bars \\ E_c = E_1 = 9,88bars \end{array} \right.$$



$$\lambda_c = 1,1$$

$$\lambda_d = 1,12 \text{ (semelle carré } 3*3)$$

$$B_0 = 0,6\text{m} \quad \alpha = 1/3$$

Le taux de travail transféré à la fondation est de 1,5 bar

$$w_1 = \frac{1/3}{9 * 9,88} * 1,5 * 1,1 * 3 + \frac{2}{9 * 11,42} * 1,5 \left[ 1,12 * \frac{3}{1,5} \right] * 1/3$$

$$w_1 = 0,0279\text{m} = 2,79\text{cm}$$

**Pour SP2 :**

$$E_d = \frac{3,2}{\frac{1}{9,42} + \frac{1}{0,85.4,27} + \frac{1}{16,66}} = 38,74\text{bars}$$

$$E_d = 38,74\text{bars}$$

$$E_c = E_1 = 9,42\text{bars}$$

$$\alpha = 1/4$$

$$w_2 = \frac{1/4}{9,42*9} * 1,5 * 1,1 * 3 + \frac{2}{9*38,74} * 1,5 \left[ 1,12 \frac{3}{1,5} \right] * \frac{1}{4} = 0,019\text{m} = 1,9\text{cm}$$

$$w_2 = 1,9\text{cm}$$

**Pour SP3 :**

$$E_d = \frac{3,2}{\frac{1}{10,3} + \frac{1}{0,85.9,5} + \frac{1}{9,49}} = 10\text{bars}$$

$$E_d = 10\text{bars}$$

$$E_c = E_1 = 10,3\text{bars}$$

$$\alpha = 1/2$$

$$w_3 = \frac{1/2}{9*10,3} * 1,5 * 1,1 * 3 + \frac{2}{9*10} * 1,5 \left[ 1,12 \frac{3}{1,5} \right] 1/2 = 0,02\text{m} = 2,86\text{cm}$$

$$w_3 = 2,86\text{cm}$$



### V.5. Calcul des tassements avec Flac

Le calcul est effectué pour le sondage pressiométrique (SP2), où on a pris un modèle d'une fondation carrée sur le sol étudié précédemment composé de trois couches de paramètres différents (on signale que ces paramètres sont ceux qu'on a déjà identifié précédemment).

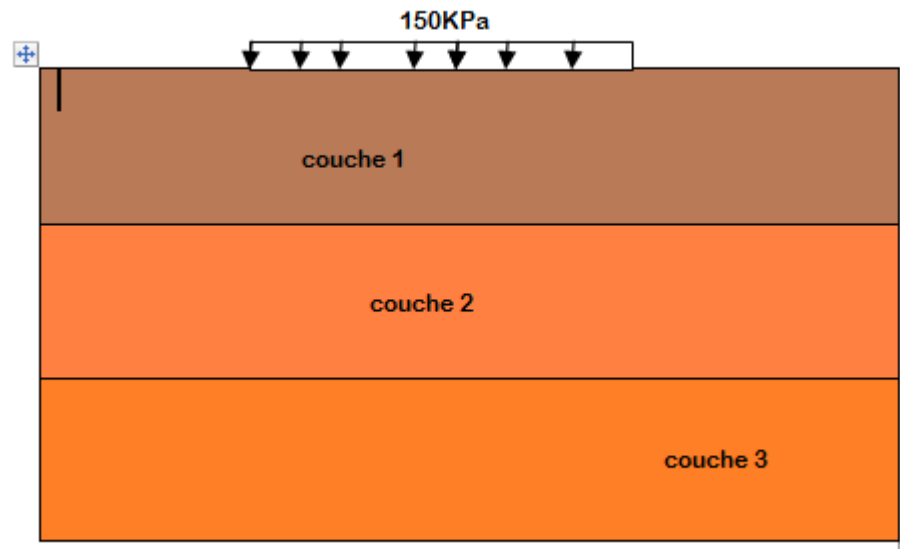


Figure V.8 : calcul des tassements d'une fondation carrée pour SP2

Les paramètres des trois couches utilisés dans le calcul des tassements pour le sondage pressiométrique 2(SP2) avec Flac sont récapitulés dans le tableau suivant :

Tableau V.9 : les paramètres utilisés pour le calcul des tassements avec Flac

Les couches	K(MPa)	G(MPa)	$\gamma_d(\text{KN/m}^3)$	Cu(KPa)	$\Phi(^{\circ})$
Alluvion, sable	3,15	2,8	2,06	120	30
Marne graveleuse sableuse	11,4	8,5	2,03	120	27,5
Schiste marneux	3,1	9,8	2,06	42	28

#### V.5.1. Modèle utilisé dans la simulation

Dans cette partie on a fait un calcul des tassements d'une fondation carrée sur un sol composé de trois couches, le modèle utilisé est celui de Mohr Coulomb, le maillage choisi, ainsi que les conditions aux limites est représenté sur la figure ci-dessous :

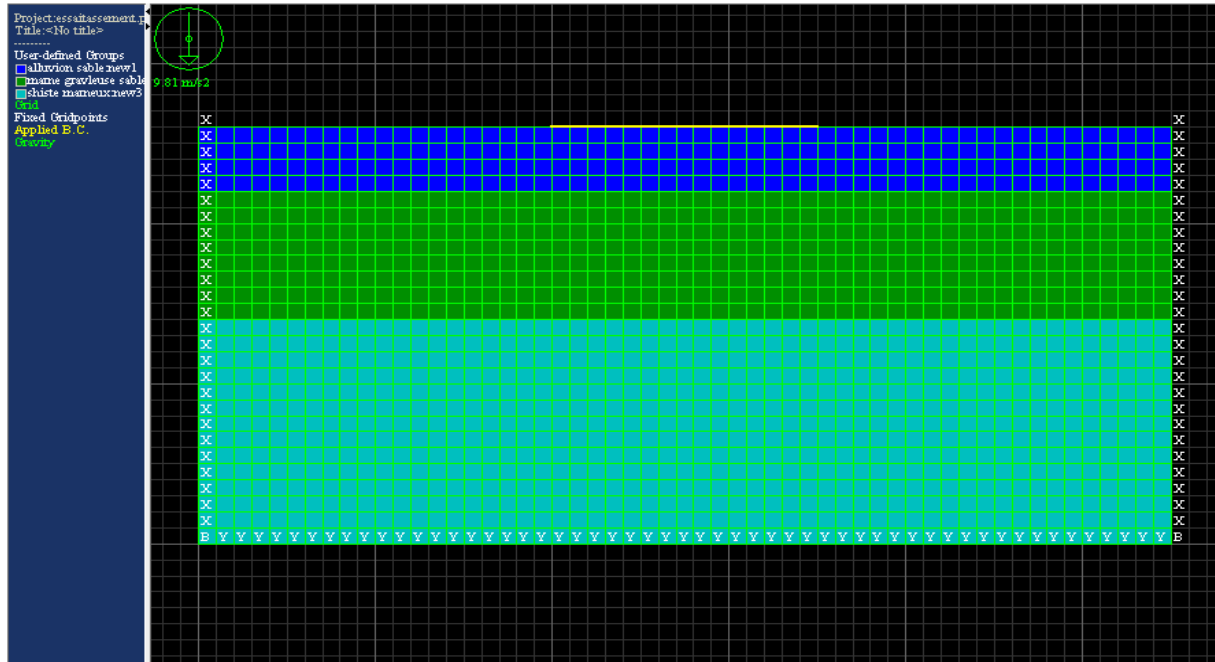


Figure V.9 : Modèle utilisé pour le calcul du tassement

### V.5. Résultats obtenus

Les résultats obtenus pour le calcul des tassements de la fondation avec Flac sont illustrés par les figures suivantes :

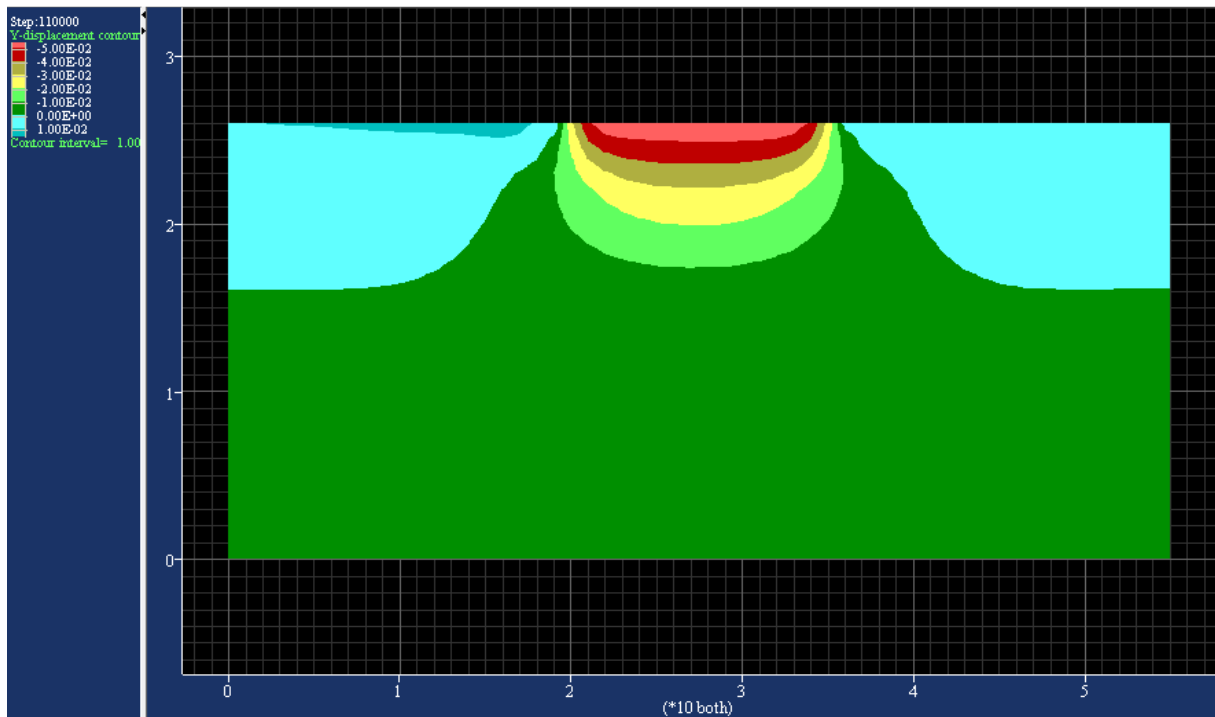


Figure V.10 : les tassements du sol



On remarque que le tassement maximum de la fondation représenté par la zone rouge dans la figure ci- dessus est égal  $5 \cdot 10^{-2} \text{m}$  qui est égale aussi à 5 cm. On faisant la comparaison entre la valeur du tassement calculé à partir de l'essai pressiométrique pour le sondage pressiométrique (SP2) qui est égale à 1cm, et celles calculées avec Flac on peut constater que ces deux valeurs sont vraiment proches, et pour cela on peut conclure qu'une bonne identification des paramètres du sol est faite proche de la réalité.

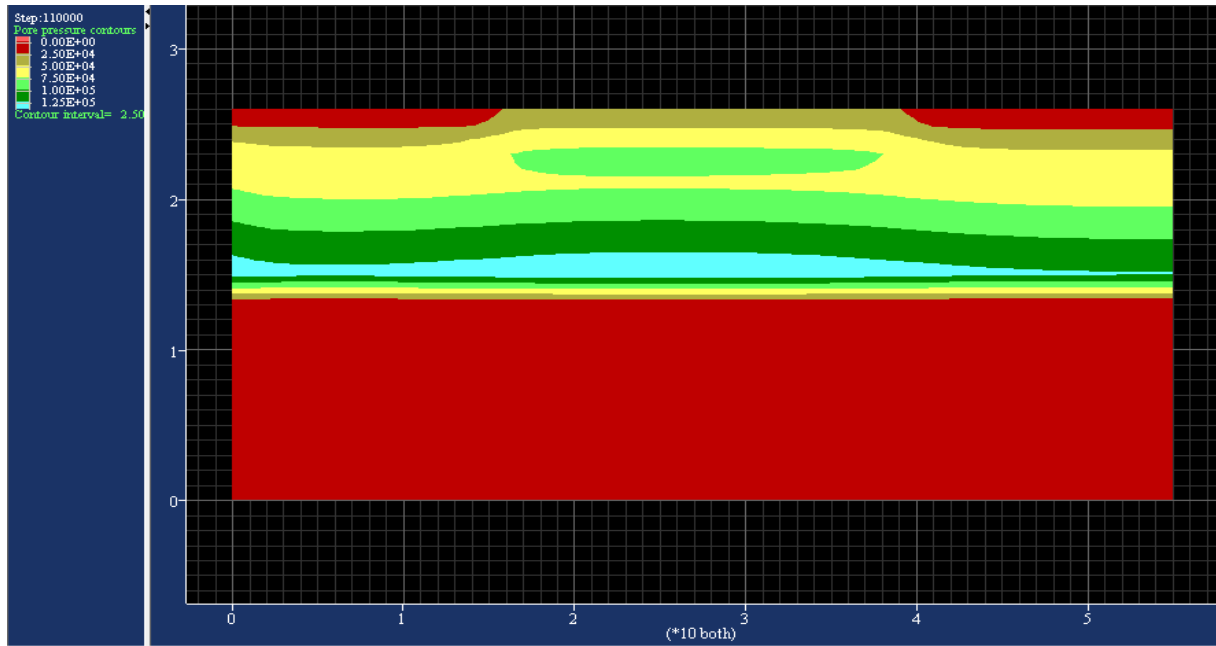


Figure V.11 : les pressions interstitielles

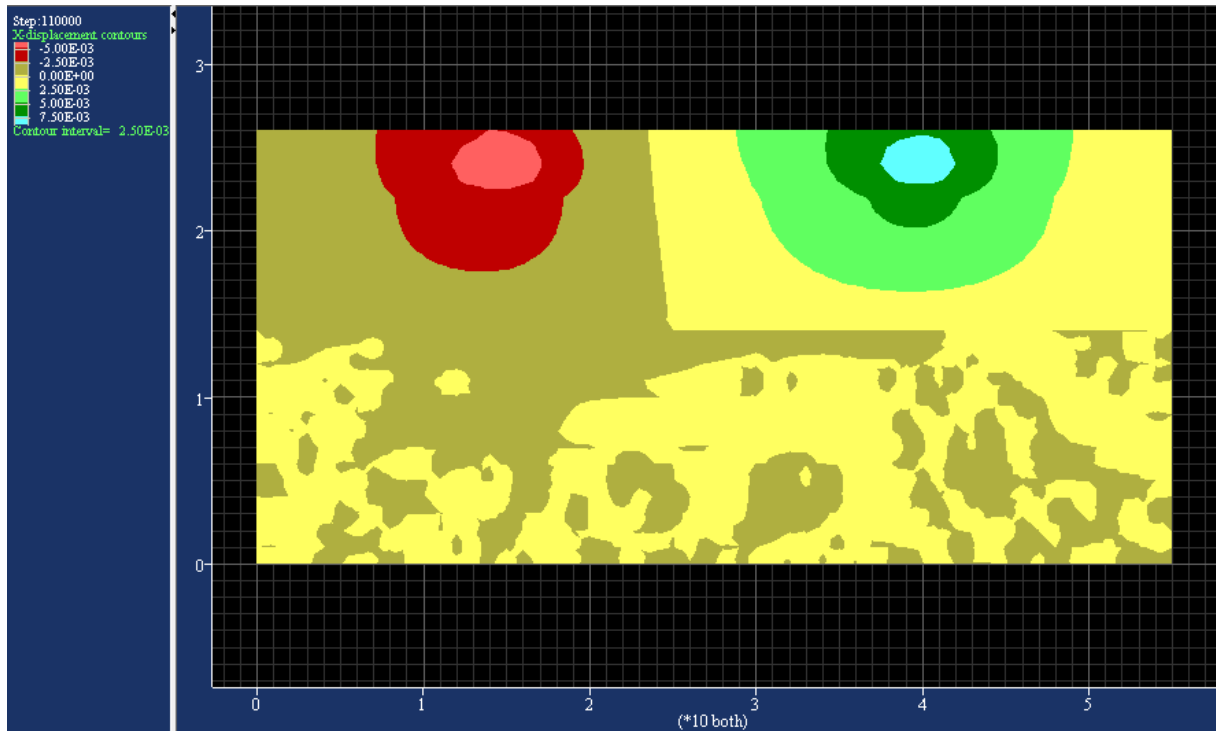


Figure V.12 : déformation du sol

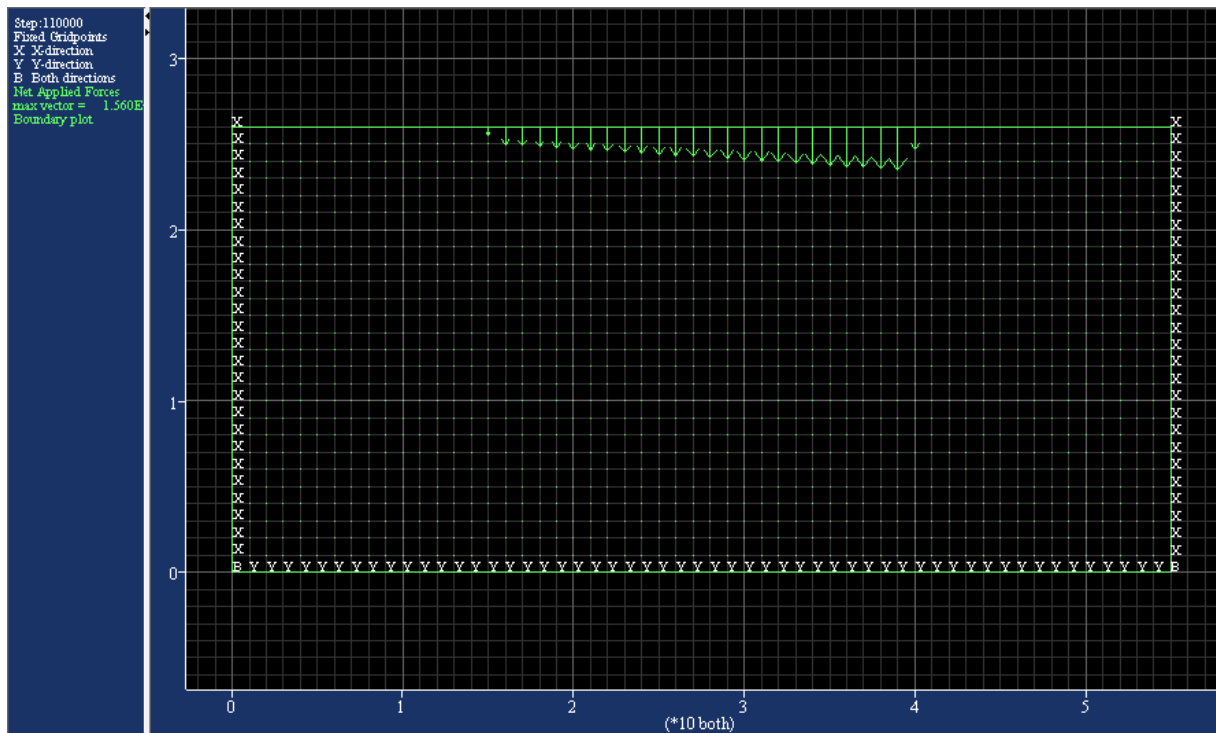


Figure V.13 : le chargement appliqué par la fondation

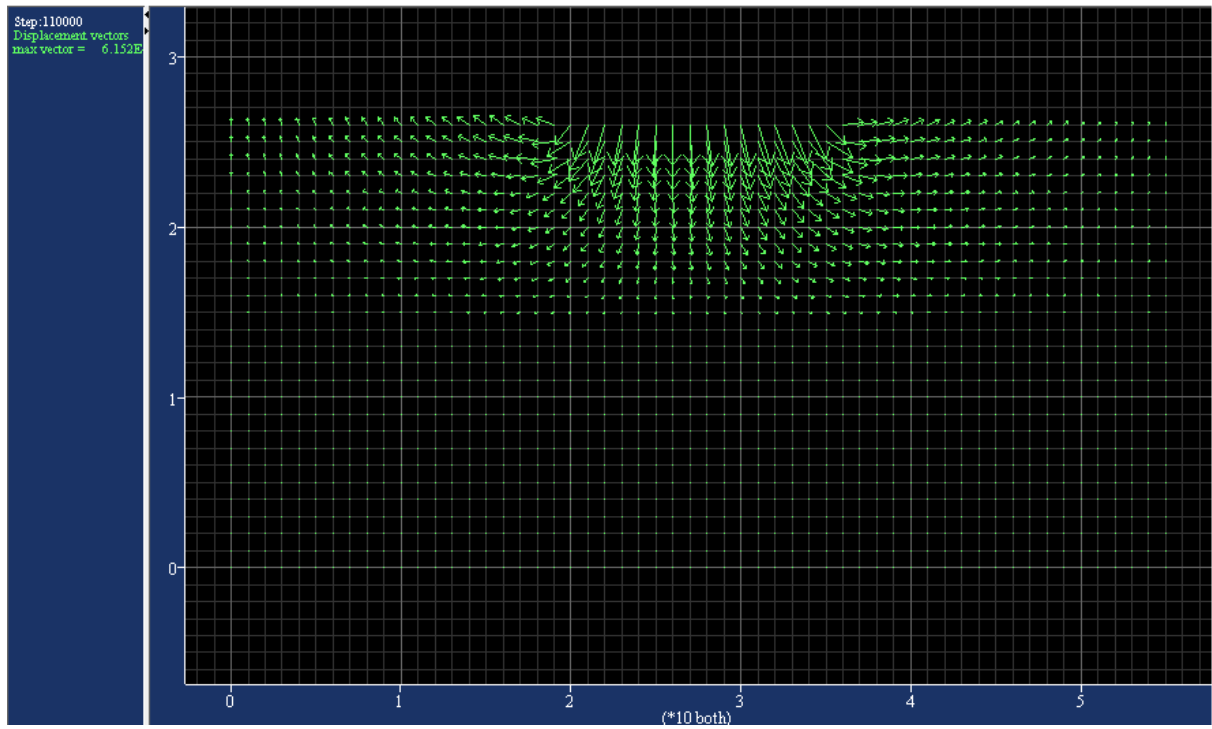


Figure V.14 : les vecteurs déplacements avec refoulement du sol

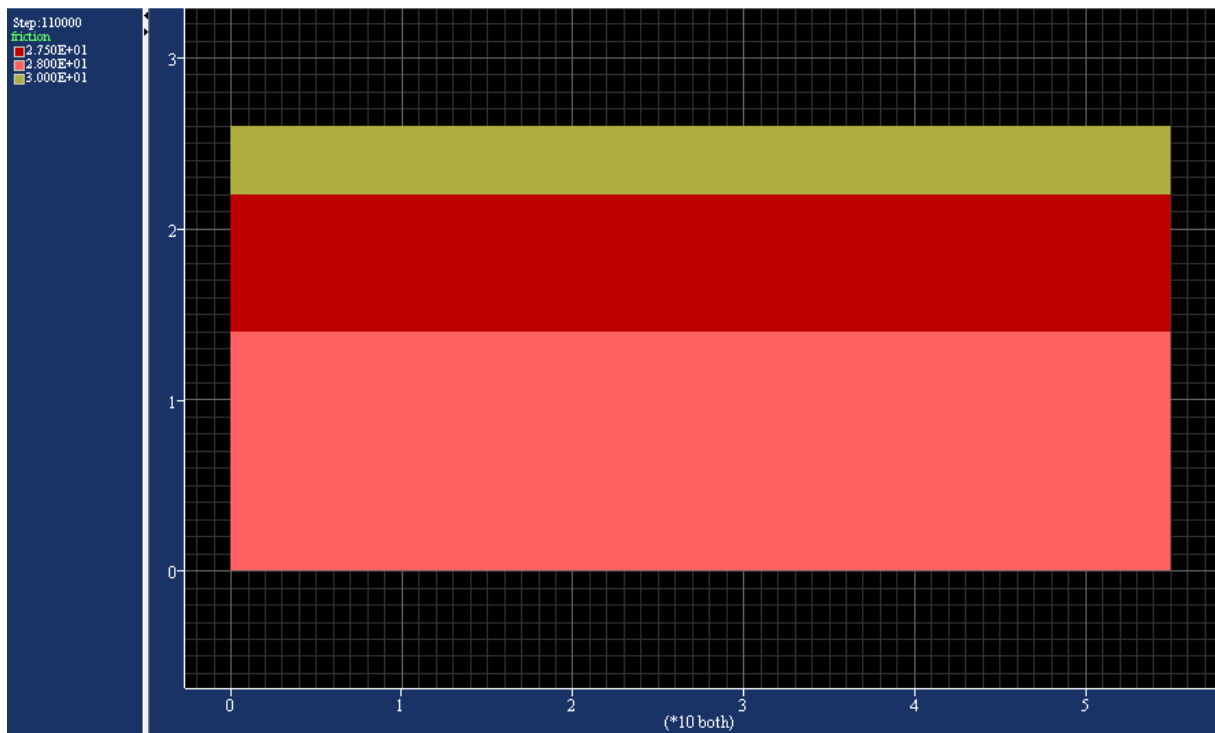


Figure V.15 : les différentes cohésions pour les 3 couches



### V.6. Conclusion

On s'est consacré dans ce chapitre de faire un calcul des tassements à l'aide de la méthode Menard, ces résultats sont comparés avec ceux tirés à partir d'un essai œdométrique réalisé dans le laboratoire (LNHC), vu l'importance de ce phénomène, et aussi aux conditions complexes relatives au problème de détermination des tassements du sol étudié ; on a effectué une simulation numérique avec Flac on utilisant les paramètres tirés à partir de la simulation de l'essai pressiométrique, on faisant la comparaison des résultats trouvés par les différentes méthodes on peut conclure que pour faire une bonne estimation de la valeur des tassement le calcul doit se faire avec différentes méthode est nécessaire.

## Conclusion générale

L'objectif de ce travail est de faire une modélisation d'un essai préssiométrique qui est un essai in situ très important pour faire une bonne identification des paramètres des sols proche de la réalité, l'importance de cette identification dans le domaine du génie civil nous a mené à exploiter cet essai pour avoir le maximum des paramètres du sol étudié, et pour cela, on s'est basé sur deux méthodes d'interprétation.

En premier lieu on a fait un calcul analytique des paramètres du sol étudié ; en suite, on a fait une simulation de cet essai avec le logiciel Flac 2D à l'aide d'un modèle de Mohr Coulomb.

Les caractéristiques tirées sont les pressions limites  $P_1$  et les modules préssiométriques  $E_p$  qu'on a introduit directement dans les calculs des tassements d'une fondation superficielle à l'aide de deux méthodes différentes, la première qui est la méthode de Ménard, et l'autre avec le logiciel Flac.

En fin, la comparaison des résultats tirés à partir des deux méthodes montre que pour faire une bonne reconnaissance d'un sol, une modélisation numérique des essais est très importante.

## **BIBLIOGRAPHIE**

Al HUSSEIN Bassam, (1999), *influence de l'éclatement du pressiomètre sur la mesure des propriétés de résistance et de déformation des argiles et conditions non drainées*. Diplôme de maîtrise de sciences appliquées .Ecole polytechnique de MONREL.

ALHUSSEIN Mohamed, (2001), *Etude du comportement différé des sols et ouvrages géotechnique*. Thèse Doctorat préparé au sein du laboratoire sols, solides, structures.

ARABET Leila, (2010), *Modélisation de numérique du tassement et de la consolidation des sols sous l'oedomètre*. Thèse magistère, université 20 AOUT de SKIKDA.

BELHASANI Ouarda, *Modélisation de l'essai pressiométrique cyclique*. Thèse de Magistère, ununiversité des sciences et technologies Houari BOUMEDIENNE de BABA EZZOUAR.

BENMOUSSA Samir, (2013) *Analyse de l'influence de la stratification sur la portance des fondations superficielles*. Thèse Doctorat université de KHIDER Mohammed de BISKRA.

BENTALBI Youcef , (2011), *Analyse théorique numérique du comportement non drainé d'une argile surconsolidée lors d'un essai pressiométrique* . Mémoire de maîtrise sciences appliquées.

BORNAREL Bruno, (1999), *Fondations superficielles sur pente et essai pressiométrique Approche numérique*. Thèse Doctorat école centrale de LION.

CHEIKHI SARR, (2007), *Etude comparative entre les méthodes de calcul des pieux, Application à l'échangeur de la patte d'OIE*. Thèse d'ingénieur Ecole supérieure polytechnique, université de CHEIKH ANTA DIOP de DAKAR.

GUETTAFI Nesrine ,( 2012), *comportement des sols mous lors d'un essai pressiométrique*. Thèse magistère université d'EL HADJ LAKHDAR, BATNA.

HADDAOUDOU Hakima et HADDAR Lynda, (1997), *Etude des propriétés des argiles au pressiomètre Ménard et calcul des fondations superficielles*. Thèse d'ingénieur université de Mouloud Mammeri de TIZI OUZOU.

Mangan Jean-Pierre, *Méthode approchée pour prévision des vitesses de tassement des sols fins doués de fluage*, Ecole nationale des ponts et des chassées France.

Mangan (2004), FONDSUP,(2003)-vol .2 presses de L'ENPG (LCPC,PARIS)

Mangan Jean-Pierre, Yvre CANEPA, Nicolaï DRONIUC, *les méthodes de calcul de la portance des fondations superficielles*, laboratoire central des ponts et des chaussées, PARIS.

MEDJINA NASRI Lamia, (2008), *les glissements de terrains en 2D et 3D Etude comparative entre le Flac et Plaxis*. Mémoire de magistère, université 20 aout 1955 de SKIKDA.

J.JEZEQEL, E.LEMEE, D.SAINTIN, *Exploitation de l'essai pressiométrique normal par la méthode numérique*, Laboratoire régionale de SAINT-BRIEUC.

Notice générale D60 version 1998.

## Description générale du logiciel FLAC-GIIC

### 1. Le bureau démarrage

Après avoir effectué l'installation du logiciel FLAC, une icône de démarrage apparaît sur le bureau de l'ordinateur. En cliquant dessus une fenêtre principale et une boîte de dialogue apparaissent sur l'écran comme sur la figure

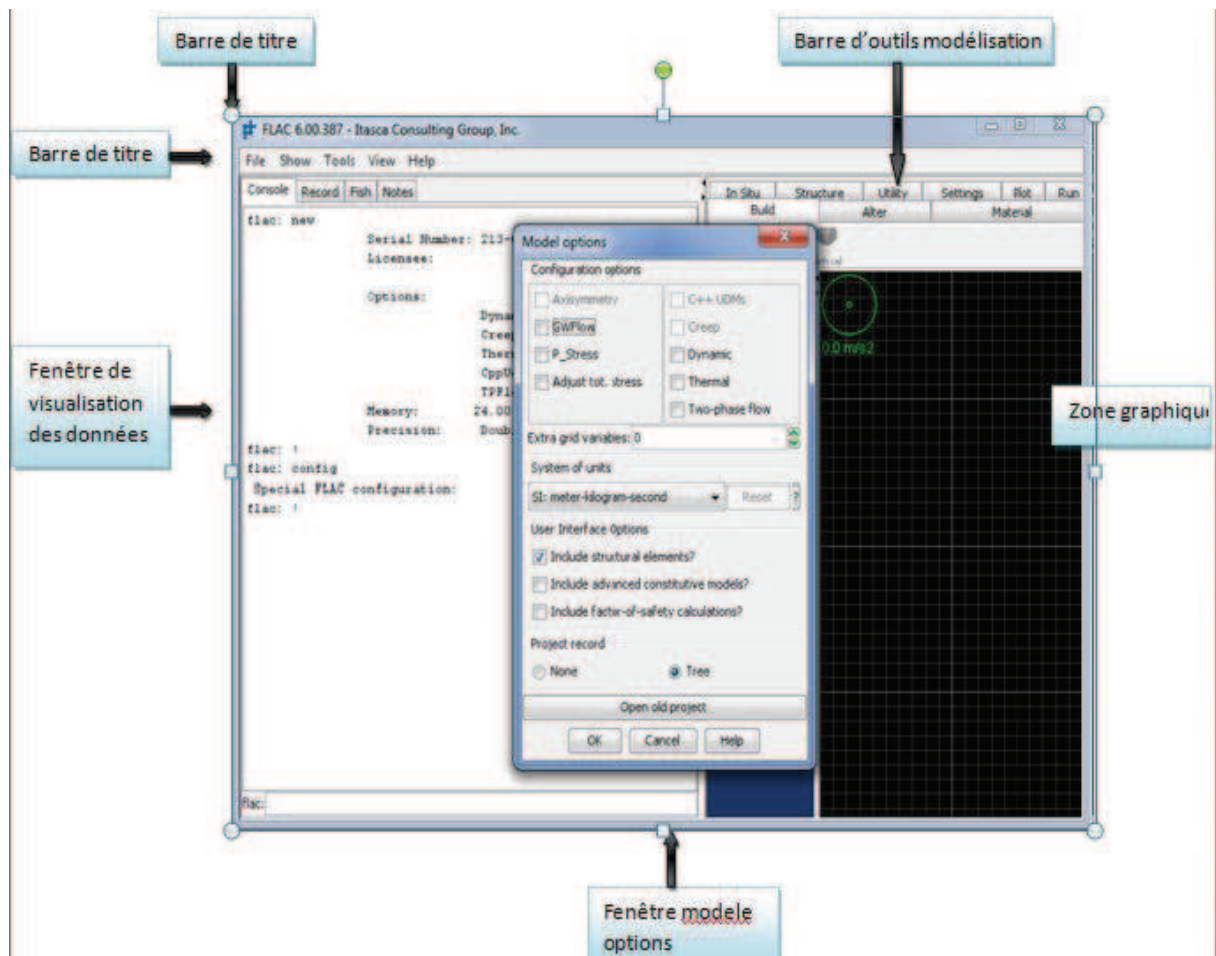


Figure 1 : Le bureau de démarrage dans la configuration graphique de F lac 2D

## 1.1. Fenêtre principale

- ◆ **Barre de titre** : On effectue les informations principales (nom, version, ainsi l'organisme qui a mis au point et développé ce logiciel)
- ◆ **Menu déroulant principale** : Permet l'accès aux commandes de flac
- ◆ **Fenêtre de visualisation des données** :  
Sert à visualiser le déroulement à toutes les commandes de Flac.
- ◆ **Zone d'état** : Se trouvant dans la partie inférieure de la fenêtre principale, affiche les informations suivantes, nom des fenêtres d'édition ouverte, coordonnées de la position du pointeur, unité .... Etc.
- ◆ **Zone graphique** : Sert à modéliser et visualiser le domaine discrétisé.
- ◆ **Barre d'outils** : les options de modélisations sont représentées par des icônes

## 2. Fenêtre de dialogue

### Modèle Option

Permet de choisir le mode et le type d'analyse selon le problème à résoudre, on peut aussi sélectionner le système d'unités à utiliser, ainsi que le modèle de comportement

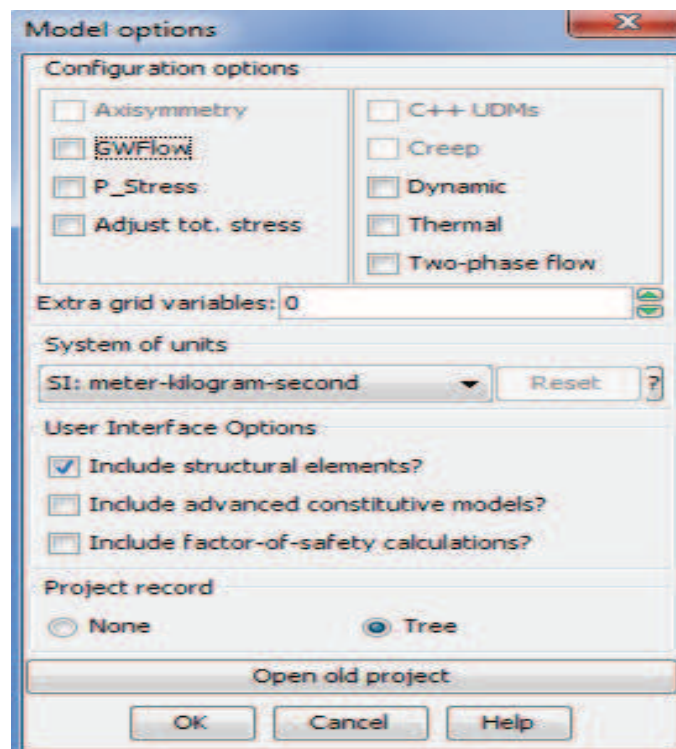
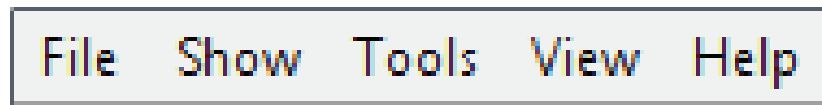


Figure 2: Fenêtre de dialogue Model Option

### 3. Menu déroulants et les barres d'outils

- **Menu déroulants :**

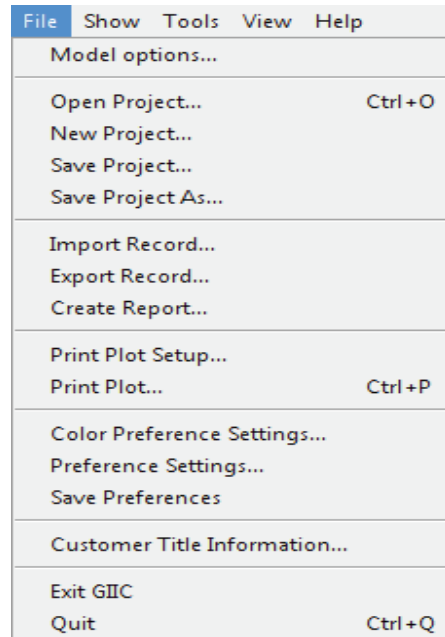


**Figure 3:** Menu déroulant principale dans la configuration graphique

### 4. Menu file

Contiens les composantes suivantes :

- **Modèle options** : permet de retourner à la boîte dialogue **Modèle options Dialog**
  - **Open Project** : permet d'ouvrir in projet enregistré au préalable
  - **Save Project** : pour effectuer automatiquement toute mise à jour ou modification d'un fichier en extension **PRJ** on enregistre le fichier avec la commande *Save Project*, sous extension **SAV**
  - **Save Project as** : enregistrer un nouveau fichier en extension **PRJ** après avoir effectuer des modifications.
  - **Import record** : importer des fichiers en extension **PRJ**
  - **Export record** : son rôle est d'exporter des fichiers en extension **PRJ** après avoir effectuer des modifications
  - **Create setup** : un fichier **HTML** sera créé lors de la lecture de tous les fichiers en extension **PRJ** formant le programme
  - **Print plot setup** : permet de choisir le format d'impression de l'élément modélisé dans la fenêtre de l'éditeur graphique
  - **Print plot** : permet d'imprimer directement sur une imprimante l'élément se trouvant dans la fenêtre de l'éditeur graphique.
  - **Color preference settings** : contrôle tout le graphisme du logiciel ainsi on peut personnaliser les couleurs de toutes les fenêtres graphique
  - **Preference setting** : permet d contrôler quelque commande du logiciel.
  - **Save preference** : permet de sauvegarder toutes les modifications effectuées
  - **Exit GIIC** : quitter le mode graphique de Flac GIIC pour revenir au mode de commande ligne .
- Quit** : sortir du logiciel FLAC

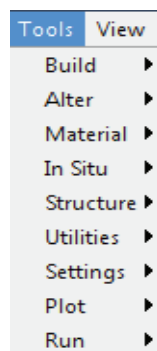


**Figure 4:** Menu file dans la configuration graphique de Flac GIIC

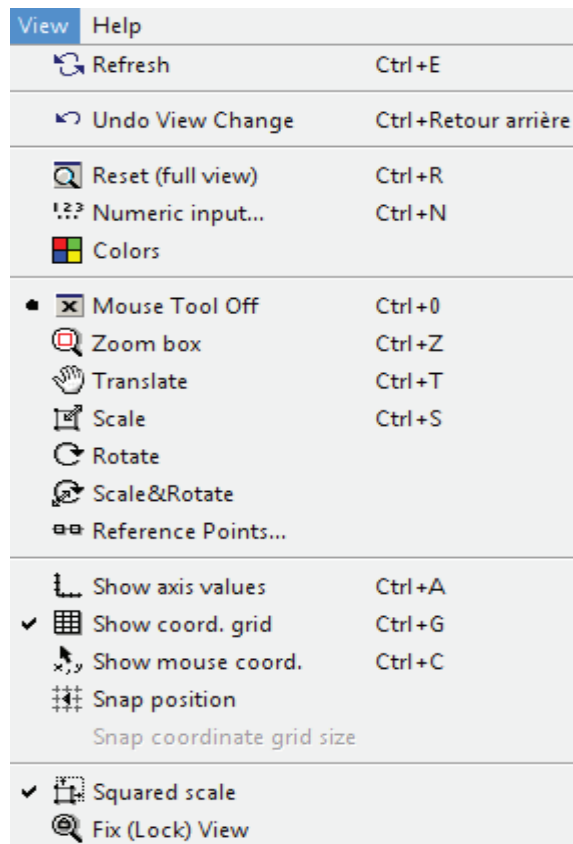
#### Menu show

- **Tools** : permet aux outils de modélisation d'être visualisés dans une barre d'outils ou comme élément de menu.
- **Viewbar** : ses éléments peuvent être montrés comme un menu déroulant ou bien comme barre d'outils qui peut être affichée ou caché.
- **Recoures** : la zone de données de source peut être affichée ou cachée avec ces éléments
- **Views** : la zone graphique peut être affichée ou avec ces éléments.
- **Statubar** : la zone d'état peut être affichée ou cachée avec ces éléments
- **Fish Editor** : la fenêtre de *Fish Editor* peut être activée ou désactivée avec ces éléments/

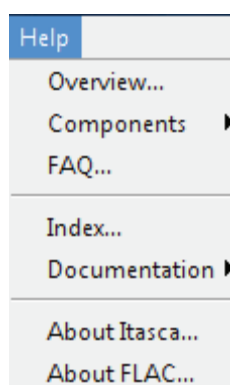
#### Menu Tools



**Figure 5 :** Menu Tools dans la configuration de FLAC GIIC



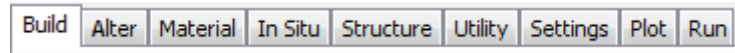
**Figure 6 :** Menu View dans la configuration de FLAC GIIC



**Figure 7 :** Menu View dans la configuration de FLAC GIIC

## 5. Barre d'outils :

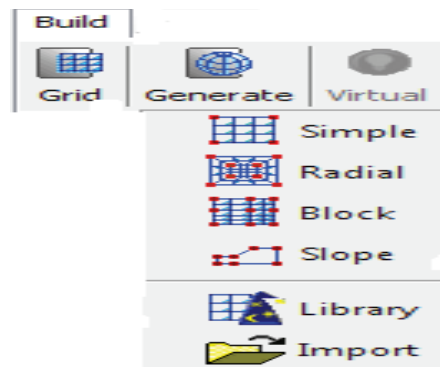
Plusieurs commandes sont assemblées dans la barre d'outils pour effectuer l'analyse complète d'un problème avec le logiciel flac.



**Figure 8:** barre d'outils dans la configuration de FLAC GIIC

- **Barre d'outils Build :**

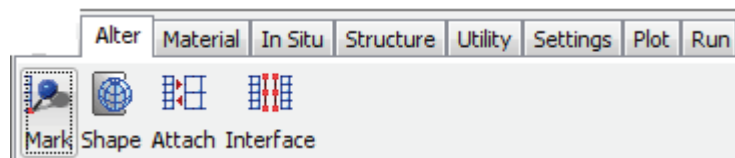
Permet de donner une première forme générale du domaine étudié



**Figure 9:** Barre d'outils Build dans la configuration de FLAC GIIC

- **Barre d'outils ALTER :**

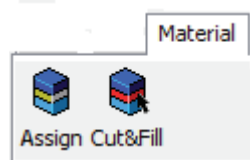
Après avoir fait une approximation du domaine à étudier on peut l'approcher de la réalité en effectuant des modifications grâce aux commandes de la barre ALTER



**Figure 10 :** Barre d'outils ALTER dans la configuration de FLAC GIIC

- **Barre d'outils Material :**

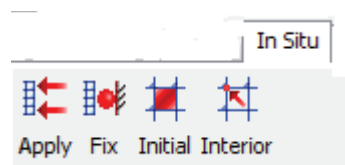
Serre à introduire le modèle de comportements et les propriétés des matériaux utilisés dans la modélisation.



**Figure 10 :** Barre d'outils MATERIAL dans la configuration de FLAC GIIC

**Barre d'outils in SITU :**

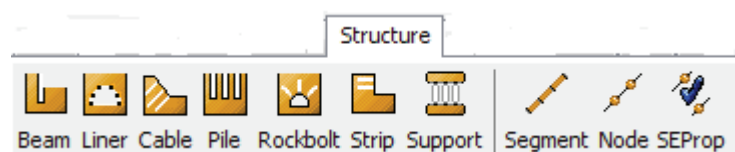
Serre à déclarer les conditions initiales et les conditions aux limites du modèle à étudier



**Figure 11 :** Barre d'outils IN SITU dans la configuration de FLAC GIIC

- **Barre d'outils STRUCTURE :**

Serre à modéliser des différentes formes géométrique d'une structure.



**Figure 12 :** Barre d'outils STRUCTURE dans la configuration de FLAC GIIC

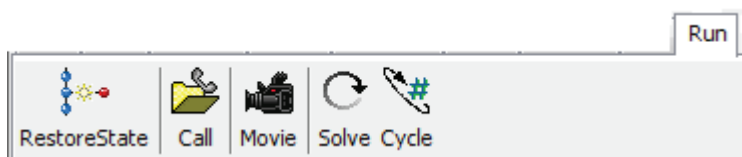
- **Barre d'outils SETTINGS :**

Serre à effectuer des modifications de la modélisation du problème à résoudre



**Figure 13 :** Barre d'outils SETTINGS dans la configuration de FLAC GIIC

- **Barre d'outils RUN :**



**Figure 14 :** Barre d'outils RUN dans la configuration de FLAC GIIC